

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO**

Andressa Borré

**UM ESTUDO SOBRE A ANISOTROPIA EM MATERIAIS
FERROMAGNÉTICOS**

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Borré, Andressa
Um estudo sobre a anisotropia em materiais
ferromagnéticos / Andressa Borré ; orientador, Jean Viane
Leite, 2019.
77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Anisotropia em materiais
ferromagnéticos. I. Viane Leite, Jean. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Andressa Borré

**UM ESTUDO SOBRE A ANISOTROPIA EM MATERIAIS
FERROMAGNÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Bacharelado em Engenharia Elétrica para a obtenção do Grau de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Viane Leite

Florianópolis

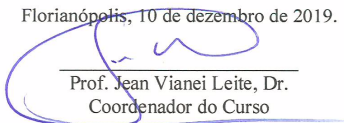
2019

ANDRESSA BORRÉ

**UM ESTUDO SOBRE A ANISOTROPIA EM MATERIAIS
FERROMAGNÉTICOS**

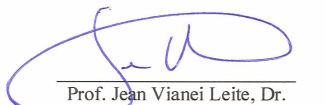
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de dezembro de 2019.




Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso

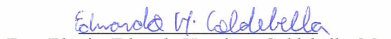
Banca Examinadora:



Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Eletric. Eduardo Henrique Coldebella, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e colegas que estiveram presentes durante toda a graduação, pela troca de conhecimentos e incentivo à permanência no curso. Também, agradeço ao orientador Professor Dr. Jean Viane Leite, pela disposição ao tema escolhido e por todo auxílio na elaboração desta monografia. De mesma forma, agradeço ao Professor Dr. Renato Lucas Pacheco, pelo encaminhamento e auxílio na procura pelo orientador e tema. Por fim e em especial, agradeço a toda a minha família pelo apoio, compreensão e pela confiança desde sempre.

RESUMO

Esta monografia refere-se ao estudo teórico acerca da anisotropia em materiais ferromagnéticos. Inicialmente, apresenta-se uma abordagem geral ao tema e suas definições teóricas. Posteriormente, é dado o enfoque aos aços para fins elétricos, sobretudo, os aços de grão orientado, dos quais pôde-se comprovar a interferência da anisotropia. Explora-se a diferenciação entre aços de grão orientado e de grão não orientado, bem como, as aplicações dos mesmos visando abordar, ainda que superficialmente, a teoria por trás da anisotropia em aços e um pouco da química envolvida. A partir da revisão bibliográfica, explora-se a simulação através de *software*, propondo um modelo para representar a anisotropia em aços de grão orientado. Utilizando-se o método de ODF, fica nítida a possibilidade de medir as propriedades magnéticas de interesse de um material em um ângulo arbitrário a partir do conhecimento (consulta bibliográfica ou ensaios) do valor para as direções principais, e assim, comprovar-se a interferência da anisotropia.

Palavras-chave: Anisotropia magnética. Anisotropia em aços para fins elétricos. Aços de grão orientado. Aços de grão não-orientado. Modelagem para anisotropia, ODF.

ABSTRACT

This monograph refers to the theoretical study about anisotropy in ferromagnetic materials. Initially, we present a general approach to the subject and its theoretical definitions. Later, the focus is given to steels for electrical purposes, especially the grain oriented steels which could prove the interference of anisotropy. It explores the differentiation between oriented and non-oriented grain steels as well as their applications aiming to approach, albeit superficially, the theory behind steel anisotropy and some of the chemistry involved. From the literature review, the simulation is explored through *software* proposing a model to represent the anisotropy in grain oriented steels. Using the ODF method, it is clear to be able to measure the magnetic properties of interest of a material at an arbitrary angle from the knowledge (bibliographic query or essays) of the value for the main directions, and thus prove the anisotropy interference.

Keywords: Magnetic anisotropy. Anisotropy in electric steels. Grain oriented steels. Non-oriented grain steels. Anisotropy modeling, ODF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Varição dimensional (magnetostricção) de monocristal do ferro em função da magnetização.....	27
Figura 2	Efeito de tensões elásticas na curva de magnetização...	28
Figura 3	Curvas de magnetização de diferentes materiais.....	28
Figura 4	Corte e representação de uma máquina de indução.....	31
Figura 5	Equipamento de medida SST – Single Strip Tester.....	37
Figura 6	Curvas de magnetização com o campo H aplicado em 3 diferentes direções cristalinas de um monocristal.....	38
Figura 7	Principais direções de magnetização.....	39
Figura 8	Corte da chapa GO.....	39
Figura 9	Estrutura típica cristalina do ferro.....	41
Figura 10	Dependências dos parâmetros A0, A1 e A2 versus H para os ângulos examinados.....	44
Figura 11	Anisotropia induzida, medição 1.....	45
Figura 12	Anisotropia induzida, medição 2.....	45
Figura 13	Código utilizado para geração dos dados através do formulário - Parte 1.....	47
Figura 14	Código utilizado para geração dos dados através do formulário - Parte 2.....	47
Figura 15	Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 1....	48
Figura 16	Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 2....	48
Figura 17	Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 3....	48
Figura 18	Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 4....	49
Figura 19	Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 5....	49
Figura 20	Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 6....	49
Figura 21	Resumo dos coeficientes de correlação obtidos com a função programada em <i>software</i>	56
Figura 22	Coefficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 0°.....	57
Figura 23	Coefficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 15°.....	57
Figura 24	Coefficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 30°.....	58

Figura 25 Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 45°	58
Figura 26 Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 60°	58
Figura 27 Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 75°	59
Figura 28 Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 90°	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Correlação permeabilidade/preço para diferentes aços elétricos.....	35
Gráfico 2	Curvas geradas com o conjunto de pontos disponibilizado para os ângulos de 0°, 45°, e 90°.....	51
Gráfico 3	Curvas geradas com o conjunto de pontos disponibilizado para os ângulos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°.....	52
Gráfico 4	Curvas geradas com o conjunto de pontos calculado para os ângulos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°.....	52
Gráfico 5	Comparação entre dados medidos e calculados com o <i>script</i> realizado - ângulo de 0°.....	53
Gráfico 6	Comparação entre dados medidos e calculados com o <i>script</i> realizado - ângulo de 15°.....	53
Gráfico 7	Comparação entre dados medidos e calculados com o <i>script</i> realizado - ângulo de 30°.....	54
Gráfico 8	Comparação entre dados medidos e calculados com o <i>script</i> realizado - ângulo de 45°.....	54
Gráfico 9	Comparação entre dados medidos e calculados com o <i>script</i> realizado - ângulo de 60°.....	55
Gráfico 10	Comparação entre dados medidos e calculados com o <i>script</i> realizado - ângulo de 75°.....	55
Gráfico 11	Comparação entre dados medidos e calculados com o <i>script</i> realizado - ângulo de 90°.....	56
Gráfico 12	Curva para os dados calculados com ângulo de 0°.....	60
Gráfico 13	Curva para os dados calculados com ângulo de 5°.....	61
Gráfico 14	Curva para os dados calculados com ângulo de 10°.....	61
Gráfico 15	Curva para os dados calculados com ângulo de 15°.....	62
Gráfico 16	Curva para os dados calculados com ângulo de 20°.....	62
Gráfico 17	Curva para os dados calculados com ângulo de 25°.....	63
Gráfico 18	Curva para os dados calculados com ângulo de 30°.....	63
Gráfico 19	Curva para os dados calculados com ângulo de 35°.....	64
Gráfico 20	Curva para os dados calculados com ângulo de 40°.....	64
Gráfico 21	Curva para os dados calculados com ângulo de 45°.....	65
Gráfico 22	Curva para os dados calculados com ângulo de 50°.....	65
Gráfico 23	Curva para os dados calculados com ângulo de 55°.....	66

Gráfico 24	Curva para os dados calculados com ângulo de 60°	66
Gráfico 25	Curva para os dados calculados com ângulo de 65°	67
Gráfico 26	Curva para os dados calculados com ângulo de 70°	67
Gráfico 27	Curva para os dados calculados com ângulo de 75°	68
Gráfico 28	Curva para os dados calculados com ângulo de 80°	68
Gráfico 29	Curva para os dados calculados com ângulo de 85°	69
Gráfico 30	Curva para os dados calculados com ângulo de 90°	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Cronologia - magnetismo, eletromagnetismo e máquinas elétricas.....	26
Tabela 2	Características eletromagnéticas para os aços GO.....	29
Tabela 3	Características eletromagnéticas para aços GNO.....	32
Tabela 4	Rendimentos nominais mínimos para o Motor de Indução Trifásico - MIT.....	33
Tabela 5	Mercado de produção de aços elétricos no Brasil.....	34
Tabela 6	Produção de aços elétricos no Brasil.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RD	Direção de Laminação	22
H	Intensidade de campo magnético (A/m).....	27
B	Indução magnética ou densidade de fluxo magnético .	29
GO	Aços de grão orientado.....	29
Pfe	Perda Magnética (W/Kg).....	29
Pexc	Potência de Excitação (VA/Kg).....	29
d	Densidade	30
DR	Domain Refine - Refino de domínios magnéticos.....	30
GNO	Aços de grão não orientado	30
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.....	30
μ_r	Permeabilidade relativa máxima	32
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas	34
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos.....	38
TD	Direção Transversal.....	43
OD	Direção Ortogonal	43
ODF	Funções de Distribuição de Orientação.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.3 METODOLOGIA	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2 CARACTERIZAÇÃO E DIFERENCIAÇÃO DE AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS	25
2.1 AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS: VISÃO GERAL	25
2.1.1 Aços de Grão Orientado - GO	29
2.1.2 Aços de Grão Não Orientado - GNO	30
2.2 UTILIZAÇÃO DOS AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS	32
2.2.1 Utilização e Destaques no Brasil	33
3 ANISOTROPIA MAGNÉTICA E SEUS EFEITOS EM AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS	37
3.1 DEFINIÇÃO	37
3.1.1 Medição da Anisotropia	37
3.1.2 Anisotropia em Aços de Grão Orientado	38
3.1.2.1 Anisotropia de Forma	40
3.1.2.2 Anisotropia Magnetoelástica	40
3.1.2.3 Anisotropia do Cristal	41
4 CÁLCULOS E MODELAGEM PARA ANISOTROPIA EM AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS ORIENTADOS A GRÃOS	43
4.0.1 Abordagem Baseada na Análise de Funções de Distribuição de Orientação - ODF	43
4.0.2 Emprego e Escolha do <i>Software</i>	46
4.0.3 Aplicação	46
5 RESULTADOS OBTIDOS	51
5.0.1 Discussão	59
6 CONCLUSÃO	71
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.2 TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de reduzir o consumo de energia elétrica tem levado os governos de todo o mundo a pressionar os fabricantes de dispositivos elétricos na direção de aumentar o rendimento energético de seus produtos. Para Landgraf et al. (2002), uma das formas disponíveis é a utilização de aços com menores perdas magnéticas. Esta alternativa tem sido muito empregada por inúmeros fornecedores que investem em tecnologias e acompanham a evolução dos materiais, visando manter e atender seu mercado consumidor da melhor forma. Nos transformadores, por exemplo, uma vez que regiões com perdas excessivas podem gerar pontos de sobreaquecimento, há a necessidade de estudos que avaliem tal efeito - a falta de monitoramento destes comportamentos pode gerar prejuízos de ordem elevada.

Ainda segundo Landgraf et al. (2002), aproximadamente 50 % da energia elétrica que é produzida anualmente é utilizada por motores de tração e parte dessa energia é dissipada como "perdas elétricas". Estes índices são altíssimos. Conforme analisado pelo autor citado, nos Estados Unidos, por exemplo, estima-se que as perdas consumam 4,5 % da energia elétrica gerada. Desta forma, o estudo e entendimento da anisotropia é de essencial importância para uma modelagem mais confiável do comportamento de dispositivos eletromagnéticos.

Entende-se que o projeto otimizado de um dispositivo é possível quando se possui um modelo que possa prever seu comportamento de forma coerente. Como parte dos esforços de modelagem de máquinas elétricas estão na pesquisa dos materiais que irão compor o núcleo ativo das mesmas, propõe-se um estudo da anisotropia eletromagnética, abordando suas características gerais, com enfoque em aços para fins elétricos, sobretudo os de grão orientado, já que estes aços possuem um papel importante na matriz energética mundial.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Conforme Nakata et al. (1994), Fiorillo et al. (2002), Cornut, Kedous-Lebouc e Waeckerlé (1996) e conforme Kulkarni e Khaparde (2004), em projetos e nas mais diversas aplicações de engenharia, é de suma importância que ao se projetar circuitos magnéticos de máquinas elétricas, as relutividades alcançadas sejam reduzidas. Entende-se por relutância magnética, a medida da oposição oferecida por um meio às

linhas de campo magnético, ou seja, basicamente o inverso da permeabilidade.

Geralmente, conforme explica Landgraf et al. (2002), muitos fornecedores disponibilizam somente alguns dados em seus catálogos - dados da direção de laminação (RD) por exemplo, não mencionando o efeito da anisotropia. Também, alguns mencionam somente a conformidade de seus produtos com os padrões apropriados, sem fornecer dados mais detalhados. Organizações como a EN 10107 (Comite Europeen de Normalisation), ASTM A876 (American Society for Testing and Materials) e JIS C 2553 (Japanese Standards Association, que dispõe de tiras e chapas de aço elétrico orientadas a grãos laminados a frio no estado totalmente processado) são tipicamente citadas. Basicamente, tratam-se de órgãos de normalização que dispõe

Em concordância com os materiais consultados e utilizados no desenvolvimento deste trabalho, um controle adequado de anisotropia pode proporcionar a redução de vibrações e ruído nas máquinas elétricas, algo bastante valorizado em aplicações em que a perda de potência rotacional pode representar algo crítico. Neste sentido, a elaboração de um modelo para a anisotropia mostra-se de grande valia para a previsão do comportamento deste fenômeno nos materiais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente Trabalho de Conclusão de Curso é elaborar uma revisão teórica a respeito da anisotropia em materiais ferromagnéticos, com foco em aços para fins elétricos, mais especificamente os aços de grão orientado, bem como, desenvolver um modelo capaz de representar a anisotropia magnética nestes materiais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisa sobre anisotropia em aços para fins elétricos;
- Revisão bibliográfica acerca de aços de grão orientado e de grão não orientado;

- Pesquisa envolvendo a origem e as energias associadas à anisotropia;
- Realização dos cálculos de anisotropia;
- Implementação de simulação através de *software* representando a anisotropia em aços para fins elétricos;
- Análise dos resultados obtidos;
- Disponibilização dos resultados obtidos em favor da pesquisa e trabalhos na área.

1.3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos apresentados na seção foram realizadas as seguintes etapas:

1. Foram pesquisados os conteúdos a cerca do tema;
2. Foram selecionadas as principais referências;
3. Foi realizado um pré-processamento dos dados para a análise;
4. Foram estudadas e definidas quais as técnicas que seriam aplicadas juntamente com o Professor orientador;
5. Foram implementadas e executadas as análises;
6. Os resultados da pesquisa foram avaliados;
7. E por fim, os dados pesquisados e resultados obtidos foram registrados em formato de monografia;

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Levando-se em consideração os objetivos mencionados e almejando resultados satisfatórios para a pesquisa e desenvolvimento do trabalho, os seguintes capítulos são abordados:

- Capítulo 2 - Caracterização e diferenciação de aços para fins elétricos: O objetivo deste capítulo é classificar os aços de acordo com suas propriedades e aplicações, bem como apresentar os usos

mais adequados e comuns na indústria e eletricidade. Inicialmente, narra-se uma breve história do uso de aços elétricos, a fim de mostrar a evolução na utilização destes materiais ao longo do tempo e as descobertas que proporcionaram as aplicações que temos hoje. Na sequência, aborda-se os tipos de aço para fins elétricos, para posteriormente explorar os tipos de aços - subdivididos em aços de grão orientado e aços de grão não orientado. Por fim, um enfoque é dado às principais aplicações.

- Capítulo 3 - Anisotropia magnética e seus efeitos em aços para fins elétricos: Este capítulo aborda a anisotropia magnética e seus efeitos, cuja preocupação é, principalmente, apresentar a definição para a anisotropia segundo as referências encontradas e, posteriormente, seguir com a abordagem estudada no decorrer do trabalho, ou seja, a anisotropia em aços de grão orientado.
- Capítulo 4 - Cálculos e modelagem para anisotropia em aços para fins elétricos orientados a grãos: Este capítulo aborda os cálculos para a anisotropia baseado nos estudos já desenvolvidos na área e nas equações utilizando-se o modelo ODF. Esta abordagem é utilizada por Chwastek et al. (2015) e foi escolhida como base para este trabalho. Também, através do conjunto de medições disponível, obteve-se a base para a modelagem em ângulos arbitrariamente escolhidos. Para isso, utilizou-se a programação em *software* visando-se desenvolver os cálculos de forma interativa, para posteriormente os resultados serem comparados com os disponibilizados e poder-se concluir a respeito da interferência da anisotropia.
- Capítulo 5 - Resultados Obtidos: Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos com a pesquisa e aplicação do método escolhido.
- Capítulo 6 - Conclusão: O capítulo expõe as considerações finais do tema, avaliando a teoria abordada com os resultados obtidos e visando o compartilhamento do aprendizado assimilado.

2 CARACTERIZAÇÃO E DIFERENCIAÇÃO DE AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS

2.1 AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS: VISÃO GERAL

Os aços elétricos interessam a dois segmentos econômicos: a siderurgia e a indústria da eletricidades. Eles são utilizados por terem uma qualidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético aplicado. Para Landgraf et al. (2002), essa propriedade é conhecida como permeabilidade magnética e é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas (motores, geradores, transformadores, e outras).

A permeabilidade magnética é importante nas aplicações que precisam atingir altos campos magnéticos no entreferro (geradores) ou para os fabricantes de máquinas de alto desempenho energético (transformadores e motores). Também, para Landgraf et al. (2002), seu valor varia de acordo com o material, sendo uma característica importante na hora de se avaliar qual o aço mais adequado para uma dada aplicação.

Basta que o objeto seja exposto a um campo magnético externo para que os "momentos magnéticos atômicos" se orientem e induzam um campo magnético muito maior que o campo externamente aplicado. Assim, Landgraf et al. (2002) expõe que a permeabilidade magnética pode ser melhor entendida se vista como um poder amplificador do material.

Estima-se que em torno de 99,9 % do campo magnético que existe no entreferro da máquina foi originado no interior do aço, resultado do alinhamento dos "momentos magnéticos atômicos" dos átomos de ferro que o compõe e a intensidade do campo magnético no interior do material é chamada de indução magnética (LANDGRAF et al., 2002). O nome é dado já que esse magnetismo foi "induzido" pelo campo aplicado externamente.

Os aços elétricos são utilizados em inúmeras aplicações e o investimento com pesquisas surgiu devido a pressão por menores custos, que para Landgraf et al. (2002) disseminou o uso dos aços de baixo carbono em motores, substituindo os aços ao silício de custo mais elevado. Lancarotte e Jr (1999) apresenta uma cronologia abordando as principais datas de evolução do uso dos aços na Tabela 1.

Tabela 1 – Cronologia - magnetismo, eletromagnetismo e máquinas elétricas

Materiais Magnéticos	Eletromagnetismo	Máquinas Elétricas
Aço de baixo carbono	1821-Campo produzido pela corrente elétrica (Ampère) 1831-Indução magnética (Faraday)	1836-Motor CC (Davenport) 1866-Gerador CC (Siemens) 1867-Gerador CA (Gramme)
	1873-Tratado de eletricidade e magnetismo (Maxwell) 1880-Curva de histerese magnética do Fe (Warburg)	1887-Motor de indução e geradores bifásicos 1888-Motor de indução monofásico 1889-Motor de indução trifásico
1900-Aço silício para transformadores (Hadfield)	1905-Eletrodinâmica dos corpos em movimento (Einstein) 1905-Proposta teórica para o diamagn. e paramagn. (Langevin) 1906-Proposta teórica para o ferromagnetismo (Weiss) 1911-Descoberta da supercondutividade no Hg (Karmeling Onnes)	1919-Motor de passo (Walker)
1933-Aço silício de GO-Ímãs de AlNiCo 1933-1945-Desenvolvimento das ferrites	1925-Teoria do spin do elétron (Uhlenbeck e Goudsmit) 1931-Observação das paredes dos domínios (Bitter) 1935-Estrutura de domínios (Landau e Lifshitz) 1949-Arranjo das paredes de domínios magnéticos (Williams,Bozorth,Shockley)	1937-Motor de histerese (Teare)
1960-Desenvolvimento dos fios supercondutores de NbSn3 1960-Ligas amorfas 1970-Ímãs de SmCo 1983-Ímãs de NdFeB (Sagawa) 1986-Supercondutores de alta temperatura (Bednorz e Müller) 1988-Ligas nanocrist. (Yoshizawa)	1986-Modelo dos "objetos magnéticos" para as perdas magn. (Berloti)	

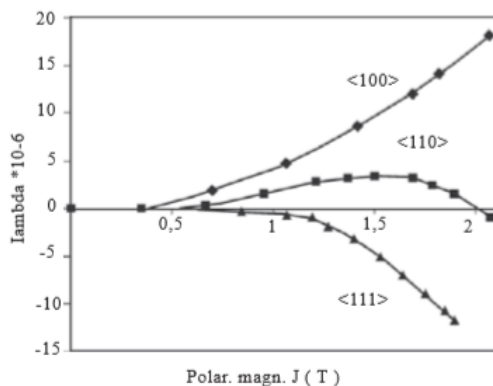
Fonte: (LANCAROTTE; JR, 1999)

Nota-se que o ideal seria trabalhar com a maior indução magnética possível, mas esta condição apresenta algumas limitações, como a existência de uma saturação magnética (que no caso do ferro é 2,15 T) e a elevada intensidade da corrente elétrica necessária para levar o material até o nível de indução magnética desejada (LANDGRAF et al., 2002).

Outra característica interessante dos aços elétricos é apresentada por Wolf (1974), que expõe que, mesmo se o material estiver desmagnetizado, os momentos magnéticos atômicos ficam alinhados em uma das direções do cristal, formando os domínios magnéticos. Em complemento a esta teoria, Landgraf et al. (2002) define as interfaces entre os domínios como paredes de domínios magnéticos. Cada domínio seria um ímã com polo norte e sul, como polos iguais se repelem, então os domínios mantêm o fluxo magnético.

Na Figura 1, os números $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ correspondem à direção dos planos atômicos no material. Este método refere-se a um conjunto de quatro solenóides dispostos num quadrado, onde corpos-de-prova de 3 cm de largura por 30 cm de comprimento são inseridos e o campo é aplicado paralelamente à direção longa do corpo-de-prova (LANDGRAF et al., 2002). Segundo o autor, o método permite que as propriedades sejam medidas em direções específicas em relação à forma da bobina. Em geral, a referência utilizada é a direção do comprimento da bobina, chamada de Direção de Laminação.

Figura 1 – Variação dimensional (magnetostricção) de monocristal do ferro em função da magnetização

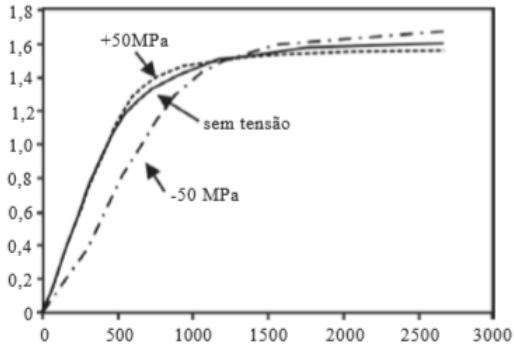


Fonte: (LANDGRAF et al., 2002)

Conforme Landgraf et al. (2002), observa-se que as perdas nos materiais ferromagnéticos e aços em geral revelam o comportamento do material. O procedimento mais comum para medir as propriedades magnéticas tecnológicas, como permeabilidade e perdas, é utilizando o Quadro de Epstein. Segundo (LANDGRAF et al., 2002), "o método

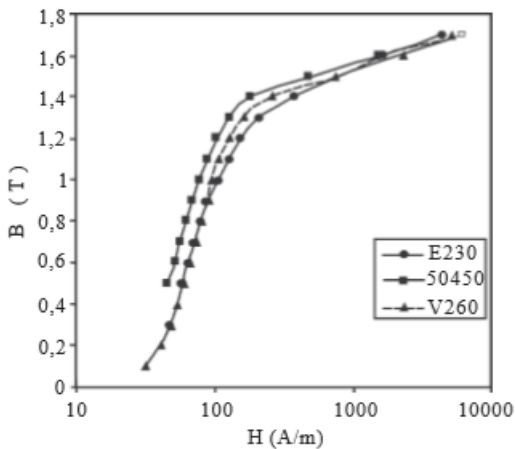
padrão assume que o valor médio das propriedades é obtido quando se monta o Quadro de Epstein com metade das lâminas cortadas na direção de laminação e metade cortadas na direção transversal", conforme se pode observar na Figura 1, onde a variação dimensional foi medida na mesma direção de aplicação do campo magnético e na Figura 2.

Figura 2 – Efeito de tensões elásticas na curva de magnetização



Fonte: (CULLITY; GRAHAM, 2011)

Figura 3 – Curvas de magnetização de diferentes materiais



Fonte: (LANDGRAF et al., 2002)

A Figura 3 mostra que a curva de magnetização dos materiais policristalinos pode variar dentre os diferentes materiais. Para contornar a dificuldade de comparar curvas, adotam-se pontos de referência, em geral para indução (B) constante. Em vez de definir o campo necessário para atingir certa indução, pode-se especificar a permeabilidade em certo valor de B (LANDGRAF et al., 2002).

2.1.1 Aços de Grão Orientado - GO

A principal aplicação de aços de grão orientado está nos transformadores de alta e média potência (SANTOS et al., 2005). Estes materiais, são aços com 3 % de silício, produzidos de maneira a induzir uma forte textura cristalográfica onde quase a totalidade dos cristais que compõem a chapa têm seus planos 110 paralelos à superfície da chapa, com a direção [001] paralela à direção longitudinal da chapa. Para Landgraf et al. (2002), suas propriedades magnéticas apresentam-se em apenas uma direção. Em transformadores grandes, onde o circuito magnético pode ser montado alinhando o fluxo magnético na longitudinal da chapa, o uso de aços de grão orientado é a melhor solução (LANDGRAF et al., 2002).

A Tabela 2 mostra as características eletromagnéticas de aço-silício de grão orientado obtidas para aços especiais do fabricante Acesita (Atual Aperam South América).

Tabela 2 – Características eletromagnéticas para os aços GO

Tipos de aços	Espessura (mm)	H (A/m)	μ_r	P_{Fe} (W/kg)	P_{exc} (VA/kg)	d (g/cm ³)
E-004	0,27	41,348	40154	1,023	1,33	7,65

Fonte: (ACESITA, 2002)

As características apresentadas na Tabela 2 significam:

- H - Intensidade do Campo Magnético para uma densidade de fluxo B de 1,5 T, 60Hz.
- μ_r - Permeabilidade Relativa Máxima.
- P_{Fe} - Perda Magnética, em W/Kg para uma densidade de fluxo de 1,5 T, 60 Hz.
- P_{exc} - Potência de Excitação, em VA/Kg para uma densidade de fluxo de 1,5 T, 60Hz.

- d - Densidade do material.

O material apresentado indica que, na direção transversal, existe uma queda de permeabilidade magnética relativa máxima. O valor em torno de 40.000 refere-se ao aço silício de grão orientado de textura única, em que todos os grãos apresentam plano do tipo [110] paralelos à superfície da chapa e com direção [001] paralela à direção de laminação (SANTOS et al., 2005).

Santos et al. (2005) destacam três tipos de aços silício GO:

- Aço GO Regular: Com baixas perdas magnéticas e permeabilidade magnética relativa máxima, perto de 1800;
- Aço GO de alta indução: Aquele cujo H e B são elevados. Para esses aços, as perdas magnéticas são menores e a permeabilidade relativa máxima chega a 1900;
- Aço GO com refino de domínios magnéticos (DR - Domain Refine): Esses são produzidos com os aços do item anterior após serem refinados com laser. Portanto, tem as perdas ainda menores e a permeabilidade maior.

2.1.2 Aços de Grão Não Orientado - GNO

Segundo abordado por Santos et al. (2005), esses aços são utilizados onde o fluxo magnético não tem só uma direção de orientação, mesmo sendo paralelas à chapa, como ocorre em motores de indução.

Três sub-famílias de aços elétricos de grão não orientado são utilizadas:

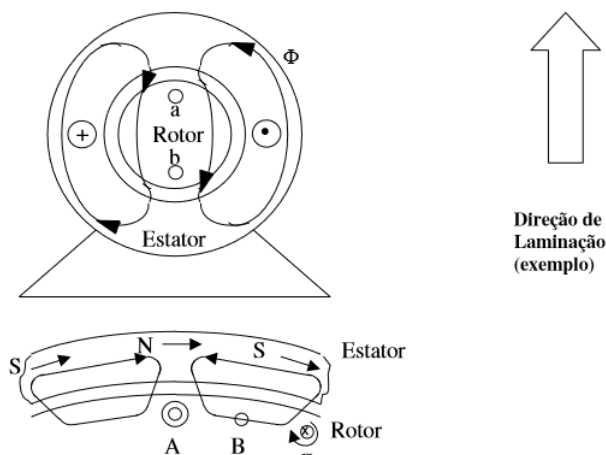
- Aços siliciosos "totalmente processados": São os aços prontos para estampagem e usos, entregue pela usina já com baixo carbono e com recozimento final, com custo ao redor de US 1.000/ton (LANDGRAF et al., 2002);
- Aços "semi-processados", siliciosos ou não: Estes são comprados por empresas que fazem o tratamento térmico final (LANDGRAF et al., 2002). Em geral possuem o custo menor, em torno de US 700/ton;
- Aços ABNT 1006/1008: Esses são aços de baixo custo (US 450 / tonelada, segundo Landgraf et al. (2002)), e podem reduzir os teores de carbono melhorando as propriedades magnéticas, segundo (YONAMINE et al., 2002), por meio de processos de recozimento.

Santos et al. (2005) ainda apresenta outro tipo de classificação que tem como parâmetro as perdas magnéticas a 1,0 T e 60 Hz:

- Aço de alto rendimento - onde as perdas magnéticas ficam em torno de 1,0 W/Kg;
- Aço de médio rendimento - cujas perdas magnéticas ficam em torno de 2,0 W/Kg ;
- Aço de baixo rendimento - cujas perdas magnéticas ficam em torno de 4,0 W/Kg (SANTOS et al., 2005).

Conforme Landgraf et al. (2002), os aços elétricos de grão não orientado muitas vezes exibem um componente Goss pronunciado, para aproveitar pelo menos uma direção de fácil magnetização, paralela à superfície da lâmina. Para o autor, pela a consciência mundial em conservar a energia já que, segundo ele, quase 50 % da energia elétrica produzida anualmente é utilizada por motores de tração, muitos fabricantes de motores elétricos têm pressionado as siderúrgicas para conseguir aços com melhores desempenhos magnéticos, para aumentar a eficiência de seus produtos. A Figura 4 mostra em corte uma máquina de indução.

Figura 4 – Corte e representação de uma máquina de indução



Fonte: (SANTOS et al., 2005)

A Tabela 3 apresenta as características eletromagnéticas para aços GNO, conforme as curvas típicas de aços ao silício de grão não orientado - aços especiais, fornecidas por Acesita (2002):

Tabela 3 – Características eletromagnéticas para aços GNO

Tipos de aços	Espessura (mm)	H (A/m)	μ_r	P_{Fe} (W/kg)	P_{exc} (VA/kg)	D (g/cm^3)
E – 105	0,27	1769	10870	3,1	35,8	7,60
E – 110	0,30	1835	10100	3,2	37,2	7,60
E – 115	0,35	1822	9800	3,3	37,0	7,65
E – 125	0,50	2103	9650	3,4	43,2	7,65
E – 137	0,50	979	8000	3,6	19,5	7,65
E – 145	0,50	1015	7750	3,7	20,3	7,65
E – 157	0,50	960	7750	3,7	19,2	7,65
E – 170	0,50	943	7350	3,9	19,0	7,70
E – 185	0,50	1003	7350	4,2	20,0	7,70
E – 230	0,50	1086	6750	4,5	21,8	7,70

Fonte: (ACESITA, 2002)

As grandezas apresentadas na Tabela 3 significam:

- H - Intensidade do Campo Magnético para uma densidade de fluxo B de 1,5 T, 60 Hz (Curva normal de magnetização);
- μ_r - Permeabilidade Relativa Máxima (Curva de permeabilidade);
- P_{Fe} - Perda Magnética, em W/Kg para uma densidade de fluxo de 1,5 T - 60 Hz (Curva de perda magnética);
- P_{exc} - Potência de Excitação, em VA/Kg para uma densidade de fluxo de 1,5 T - 60Hz (Curva de potência de excitação);
- d - Densidade do material.

2.2 UTILIZAÇÃO DOS AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS

Reforçando a necessidade de aumento do rendimento dos motores, verifica-se a importância fundamental de se conhecer as propriedades do aço para fins elétricos, conforme Santos et al. (2005). Na Tabela 4 verifica-se o padrão mínimo de rendimentos esperados para o Motor de Indução Trifásico, por exemplo.

Tabela 4 – Rendimentos nominais mínimos para o Motor de Indução Trifásico - MIT

PADRÃO					
POTÊNCIA		PÓLOS			
cv ou hp	KW	2	4	6	8
1.0	0.75	77.0	78.0	73.0	66.0
1.5	1.1	78.5	79.0	75.0	73.5
2.0	1.5	81.0	81.5	77.0	77.0
3.0	2.2	81.5	83.0	78.5	78.0
4.0	3.0	82.5	83.0	81.0	79.0
5.0	3.7	84.5	85.0	83.5	80.0
6.0	4.5	85.0	85.5	84.0	82.0
7.5	5.5	86.0	87.0	85.0	84.0
10.0	7.5	87.5	87.5	86.0	85.0
12.5	9.2	87.5	87.5	87.5	86.0
15.0	11	87.5	88.5	89.0	87.5
20.0	15	88.5	89.5	89.5	88.5
25.0	18.5	89.5	90.5	90.2	88.5
30.0	22	89.5	91.0	91.0	90.2
40.0	30	90.2	91.7	91.7	90.2
50.0	37	91.5	92.4	91.7	91.0
60.0	45	91.7	93.0	91.7	91.0
75.0	55	92.4	93.0	92.1	91.5
100.0	75	93.0	93.2	93.0	92.0
125.0	90	93.0	93.2	93.0	92.5
150.0	110	93.0	93.5	94.1	92.5
175.0	132	93.5	94.1	94.1	
200.0	150	94.1	94.5	94.1	
250.0	185	94.1	94.5		

Fonte: (SANTOS et al., 2005)

2.2.1 Utilização e Destaques no Brasil

O mercado brasileiro de aços elétricos foi estimado pelo IPT em 200 milhões de dólares anuais em 1998. O Brasil consome hoje aproximadamente 30.000 t anuais de aços do tipo grão-orientado e 300.000 t anuais de aços da família dos aços de grão não-orientado (produzidos pela Acesita, Usiminas, CSN e Cosipa) (LANDGRAF et al., 2002). Conforme exposto por Landgraf et al. (2002), a tecnologia atual de fabricação dos motores elétricos utiliza chapas de aço que visam o estator e rotor com melhor desempenho energético, aplicando-se um tratamento térmico para reduzir o teor de carbono do aço a menos de 0,003 %, eliminação de encruamentos, obtenção de grãos com tamanho em torno

de 150 micrometros e uma isolação elétrica entre as lâminas.

O material mais utilizado nos motores elétricos continua sendo a chapa de aço tipo ABNT 1006 sem recozimento, pelo seu baixo custo, correspondendo a 30 % das 335.000 toneladas anuais de aços elétricos usados em máquinas elétricas (LANDGRAF et al., 2002).

Empresas como a Weg, Embraco e Tecumseh são grandes exportadoras de motores. Segundo Landgraf et al. (2002), elas consomem mais da metade do aço de grão não orientado produzido no país. Como o mercado e a legislação de alguns países vem exigindo motores cada vez mais eficientes, tem-se investido em inovações e a tendência é de os produtos fabricados serem cada vez mais eficientes.

Um estudo para o mercado de produção de aços elétricos no Brasil foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, da Universidade de São Paulo em 1998 (LANDGRAF; TEIXEIRA; EMURA, 2002), conforme exposto na Tabela 5.

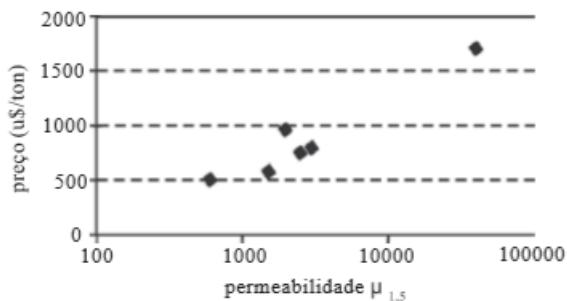
Tabela 5 – Mercado de produção de aços elétricos no Brasil

Material	Produtores	Principais consumidores	Mercado anual, 1998
Chapa de aço Si GO	Acesita	ABB, Siemens, Trafo, Toshiba	30.000 t
Chapa de aço Si GNO, totalmente processado	Acesita	Embraco, Gevisa, WEG, Intral, Fitas	65.000 t
Aço semiprocessado (com Si + Al)	Usiminas, CSN	Embraco, Tecumseh	54.000 t
Aço semiprocessado (tipo 1006)	Usiminas, CSN	Embraco, Tecumseh, Arno, Tempel	40.000 t
Aço semiprocessado (tipo 1006, relaminado e semiprocessado)	Brasmatal, Mangels, Armco	Vários	10.000 t
Chapa de aço 1006/1008	Usiminas, CSN, COSIPA	Weg, Eberle, Brasil, Kohlbach	136.000 t
		Total	335.000 t

Fonte: (LANDGRAF; TEIXEIRA; EMURA, 2002)

Nota-se que uma das tendências de desenvolvimento de novos aços para motores é justamente a busca de aços de maior permeabilidade (LANDGRAF et al., 2002). O Gráfico 1, apresenta uma correlação para permeabilidade/preço para diferentes aços elétricos, no ano de 1997.

Gráfico 1 – Correlação permeabilidade/preço para diferentes aços elétricos



Fonte: (LANDGRAF et al., 2002)

A Tabela 6 apresenta uma média de valores para a produção de aços elétricos no ano de 1998 no Brasil.

Tabela 6 – Produção de aços elétricos no Brasil

Material	Produção (milhão de toneladas)
GNO	0,119
GO	0,030
Baixo Carbono	0,186

Fonte: (SANTOS et al., 2005)

Observa-se que o consumo de aços elétricos, tanto no Brasil quanto no resto do mundo é crescente. Entender os comportamentos associados, como o da anisotropia, é importante para rendimentos maiores e obtenção de soluções mais econômicas.

3 ANISOTROPIA MAGNÉTICA E SEUS EFEITOS EM EÇOS PARA FINS ELÉTRICOS

3.1 DEFINIÇÃO

A anisotropia é a qualidade dos corpos de apresentarem propriedades físicas dependentes da direção dos fenômenos físicos a que estão sendo submetidos (CULLITY; GRAHAM, 2011), ou seja, o contrário de corpos isotrópicos em que as características não dependem de direção e sentido. Outra abordagem é dada por Amar (1994) que enfatiza que a anisotropia ocorre quando as propriedades magnéticas dependem da direção de magnetização e/ou da direção da medida das grandezas. Assim, como afirmam Zhang et al. (2014) e Demian et al. (2012), um controle adequado do nível de anisotropia é importante para a redução de vibrações e ruídos emitidos por máquinas elétricas.

3.1.1 Medição da Anisotropia

Segundo MEURER (2005) o Laboratório de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos, GRUCAD, adquiriu a bancada MPG 100D da Brockhaus Messtechnik.

Figura 5 – Equipamento de medida SST – Single Strip Tester



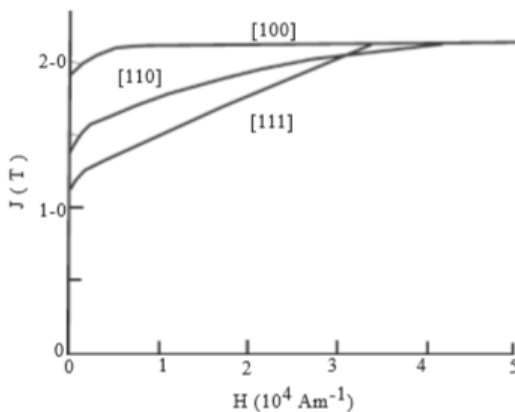
Fonte: (MEURER, 2005)

Esta bancada, teria sido adquirida através de um projeto em parceria com a FINEP e a Empresa Embraco SA, Empresa Brasileira de Compressores e realiza medições de perdas magnéticas, permeabilidade e curva de magnetização inicial. Um dos equipamentos da bancada, segundo MEURER (2005), é o responsável pelas medições de anisotropia. Chamado de Single Sheet Tester (SST), conforme a Norma IEC 404-3 (ACESITA, 2002). O equipamento funciona da seguinte forma: apenas uma lâmina de 30 mm x 280 mm é inserida e o circuito magnético é fechado pelo próprio SST que possui um núcleo interno para isso, conforme a Figura 5. Desta forma, é possível medir a anisotropia do material.

3.1.2 Anisotropia em Aços de Grão Orientado

Como o valor da magnetização de saturação é constante em todas as direções em que se aplica o campo magnético, para Cullity e Graham (2011), nas direções [110] e [111] exige-se campos muito mais altos. Na Figura 6 os valores em colchetes, identificam as direções dos átomos no plano cristalográfico, sendo que [001] é caracterizado pela região de fácil magnetização. Apresenta-se, a seguir, as curvas para estas três regiões de magnetização.

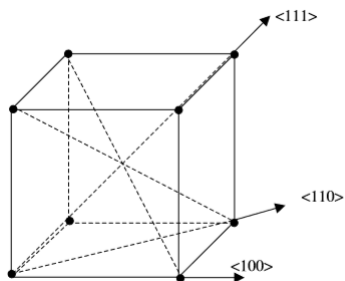
Figura 6 – Curvas de magnetização com o campo H aplicado em 3 diferentes direções cristalinas de um monocristal



Fonte: (CULLITY; GRAHAM, 2011)

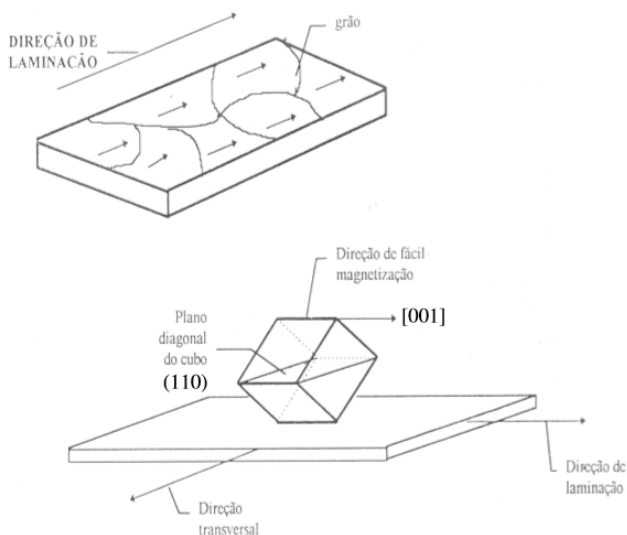
Segundo Santos et al. (2005), existe uma forte anisotropia magnética no ferro e aço silício. De acordo com as Figuras 7 e 8, nas direções $[001]$ existe uma maior facilidade de magnetização, logo, as perdas são menores e a permeabilidade magnética maior.

Figura 7 – Principais direções de magnetização



Fonte: (SANTOS et al., 2005)

Figura 8 – Corte da chapa GO



Fonte: (SANTOS et al., 2005)

Ainda conforme exposto por Santos et al. (2005), a estrutura de aço silício GO apresenta na estrutura cristalina, uma maior facilidade de magnetização quando efetuada paralelamente a direção de laminação - quando o plano diagonal do cubo [110] está paralelo ao plano da chapa. Assim, a textura Goss seria a combinação do plano (110) - diagonal do cubo, com a direção de laminação [001] conforme a Figura 8.

Outro ponto a se destacar, é que conforme salientado por Landgraf et al. (2002), elementos de liga também alteram a energia de anisotropia magnetocristalina - em menor proporção.

Conforme apresenta Cullity e Graham (2011), ocorrem cinco tipos de anisotropia:

- Anisotropia de forma;
- Anisotropia de esforços mecânicos ou magnetoelástica;
- Anisotropia do cristal ou magnetocristalina;
- Anisotropia produzida por Tratamento termo magnético - recozimento, Deformação plástica ou Irradiação;
- Mudanças anisotrópicas.

Abaixo, uma abordagem dos principais tipos de anisotropia relacionados:

3.1.2.1 Anisotropia de Forma

Esta anisotropia depende da relutância magnética do material de acordo com a geometria da amostra e da cristalização do material (SANTOS et al., 2005), o formato esférico não apresenta esse tipo de anisotropia.

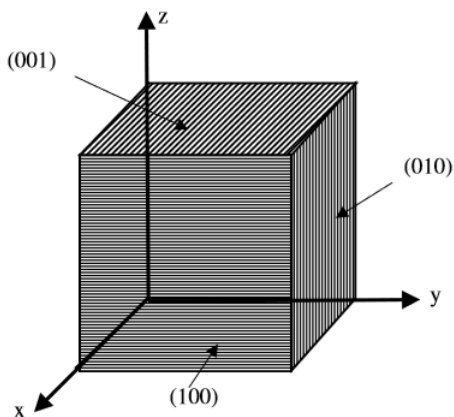
3.1.2.2 Anisotropia Magnetoelástica

Esta, produz deformação na estrutura cristalina da matéria. Para solucionar este fenômeno, segundo Santos et al. (2005), utiliza-se um tratamento térmico. Para transformadores, esta anisotropia pode ser benéfica, já que pode-se escolher um eixo para a magnetização do material. Porém, em motores de indução, conforme avaliado por Santos et al. (2005), já não é conveniente pois tem-se inúmeras direções de magnetização no material.

3.1.2.3 Anisotropia do Cristal

A anisotropia do cristal pode ser entendida como a resposta que é dada a uma determinada energia de magnetização pelas direções cristalográficas do material (SANTOS et al., 2005). Este cristal, pode ser representado com as seis faces do cubo da Figura 9.

Figura 9 – Estrutura típica cristalina do ferro



Fonte: (SANTOS et al., 2005)

4 CÁLCULOS E MODELAGEM PARA ANISOTROPIA EM AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS ORIENTADOS A GRÃOS

Segundo Wang, Li e Zhu (2014), para descrever as propriedades anisotrópicas do aço elétrico, pode-se desenvolver modelos capazes de representar as dependências para um ângulo arbitrário em relação a direção de laminação.

Diversas abordagens que permitem lidar com a anisotropia magnética têm sido propostas na literatura, cada método tendo suas próprias vantagens e limitações. O mais simples, segundo Jiang, Rossi e Parent (2018), consiste em utilizar um tensor de permeabilidade magnética diagonal envolvendo as curvas de Direção de Rolamento (RD), Direção Transversal (TD) e Direção Ortogonal (OD), sendo as outras direções consideradas pela interpolação linear (BASTOS; QUICHAUD, 1985). Outro modelo simples, chamado de modelo elíptico proposto por Dedulle et al. (1990) considera as orientações com a condição de relações não lineares entre elas. Entretanto, devido aos métodos de interpolação usados para outras direções além do RD, TD e OD, os modelos não fornecem uma boa precisão na presença de um campo rotacional, conforme revela os estudos de (JIANG; ROSSI; PARENT, 2018).

Também, uma abordagem possível para levar em conta as diferenças em dependências B/H para ângulos arbitrários de corte de amostras, baseia-se no conceito de energia (CHWASTEK et al., 2015). Nesse método, assume-se que as dependências de B/H para as direções principais (rolamento transversal) são conhecidas (CORNUT; KEDOUSLEBOUC; WAECKERLÉ, 1996), (PÉRA; OSSART; WAECKERLE, 1993), (OSSART; MEKHICHE; WAECKERLÉ, 1996) e (CHENG et al., 2009).

Chwastek et al. (2015) desenvolveram o estudo através do método ODF, cujo material serviu de base para esta monografia.

4.0.1 Abordagem Baseada na Análise de Funções de Distribuição de Orientação - ODF

De um estudo teórico sobre ODFs, Bunge (2013) indicou que qualquer propriedade física de interesse pode ser calculada através dos três coeficientes iniciais ODF:

$$A = A_0 + A_1 \cos 2\phi + A_2 \cos 4\phi \quad (4.1)$$

Onde:

$$A_0 = 0.25[A(0^\circ) + A(90^\circ) + 2A(45^\circ)] \quad (4.2)$$

$$A_1 = 0.5[A(0^\circ) - A(90^\circ)] \quad (4.3)$$

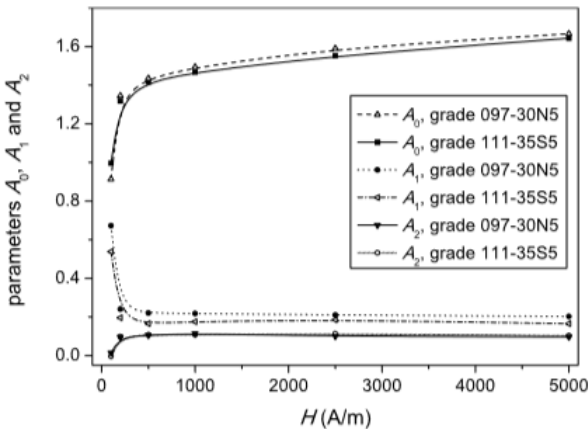
$$A_2 = 0.25[A(0^\circ) + A(90^\circ) - 2A(45^\circ)] \quad (4.4)$$

A validade da Equação 4.1, pode ser justificada levando-se em conta a simetria de ambas as folhas e a simetria ortorrômbica dos cristais cúbicos de ferro-silício no corpo (CHWASTEK et al., 2015). Das relações, observa-se que pode-se medir as propriedades magnéticas em três direções (0° , 45° e 90°) para prever as variações em outros ângulos.

Esse procedimento é semelhante ao Parâmetro de Lankford usado para avaliação de anisotropia em aços, conforme Langford, Snyder e Bausch (1950), Hosford e Caddell (2011) e Ray, Jonas e Hook (1994). Neste cálculo, o valor de 'A', obtido calculando-se 'A0', 'A1', e 'A2' é o valor da indução magnética (B).

Assim, A1 e A2 podem ser usados como índices de anisotropia. Para Chwastek et al. (2015), as variações destes parâmetros em relação à força do campo são opostas conforme a Figura 10.

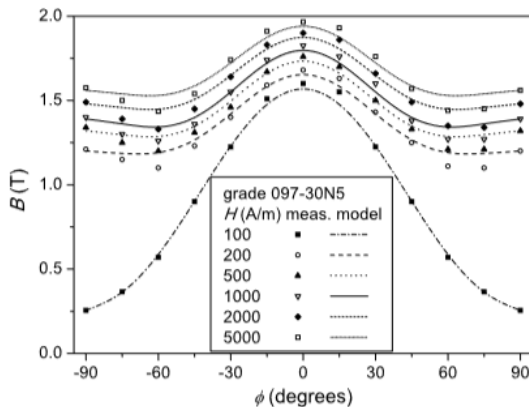
Figura 10 – Dependências dos parâmetros A0, A1 e A2 versus H para os ângulos examinados



Fonte: (CHWASTEK et al., 2015)

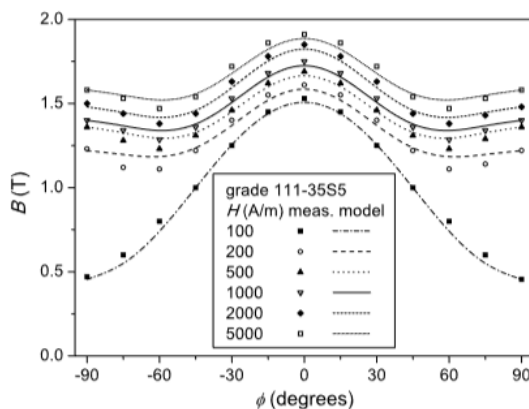
Ainda, segundo Chwastek et al. (2015), sugere-se aproveitar os parâmetros A0, A1 e A2 para calcular a anisotropia, A0 pode ser interpretado como uma medida direta da propriedade magnética de interesse e A1 e A2 próximos de zero indicam um material isotrópico.

Figura 11 – Anisotropia induzida, medição 1



Fonte: (CHWASTEK et al., 2015)

Figura 12 – Anisotropia induzida, medição 2



Fonte: (CHWASTEK et al., 2015)

Conforme as figuras 11 e 12 apresentadas acima, alterações abruptas dos valores de A_0 , A_1 e A_2 para o campo H superior ou igual a 200 A/m podem indicar a transição do mecanismo principal responsável pela magnetização (CHWASTEK et al., 2015).

Para Chwastek et al. (2015), o modelo também funciona bem para se calcular as perdas no ferro. Espera-se que algumas propriedades (como a indução magnética B), que são diretamente dependentes da anisotropia magnetocristalina (CAMPOS; LANDGRAF; TSCHIPTSCHIN, 2001), sejam bem representadas pelas Equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, uma vez que estas são as condições da Teoria de Bunge (BUNGE, 2013), uma explicação seria por as perdas no ferro também dependerem da anisotropia magnetocristalina.

4.0.2 Emprego e Escolha do *Software*

Para tornar o modelo possível, utilizou-se um *software* de simulação para observar-se o comportamento e tendência dos valores. Gerou-se os dados de forma iterativa através dos cálculos, aplicando-se o equacionamento apresentado em um código programado no *software*. Posteriormente, outra função foi desenvolvida para a visualização gráfica destes dados interpolados através do mesmo *software*. Estes resultados gráficos serão apresentados no capítulo subsequente.

4.0.3 Aplicação

Tendo-se as expressões dadas pelas Equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, bem como um conjunto de dados medidos para a densidade de fluxo magnético (B), a partir da Indução magnética (H), pode-se utilizar estas equações para prever o valor da densidade do fluxo magnético em diferentes ângulos de interesse. A partir de um conjunto de medições repassadas cujos dados levantados abrangem os ângulos de 0° , 45° e 90° , calculou-se os possíveis pontos para ângulos distintos. Optou-se por utilizar ângulos compreendidos entre 0° a 90° com intervalos de 5° .

Um primeiro código foi escrito no *software* com o intuito de fazer. As Figuras 13 e 14 apresentam os trechos do *script* desenvolvido.

Figura 13 – Código utilizado para geração dos dados através do formulário - Parte 1

```

Editor - C:\Users\Andressa\Desktop\TCC\ScriptAnisotropiaCalc.m
Script.m  ScriptAnisotropiaCalc.m
1 Bmed_0 = [0,0.342,0.9035,1.3625,1.4507,1.5419,1.5813,1.6104,1.6316,1.6477,1.661,1.6727,1.682,1.6912,1.6983,1.7057,1.7118,1.716,1.72
2 Bmed_45 = [0,0.0029,0.0157,0.0283,0.0442,0.0633,0.0846,0.1173,0.1595,0.2132,0.3105,0.4332,0.5901,0.7493,0.8465,0.8957,1.0184,1.0605,
3 Bmed_90 = [0,0.0013,0.0037,0.0085,0.0185,0.0246,0.0349,0.0451,0.0557,0.0704,0.089,0.1095,0.1395,0.1877,0.2576,0.3682,0.5223,0.6923,
4
5 alfaarray = [0,0.08726468,0.174532925,0.261799388,0.34906585,0.436332313,0.523598776,0.610865238,0.698131701,0.785598788,0.8722646
6
7 arraycalc = zeros(19,8);
8
9 for j = 1:(8)
10     alfa = alfaarray(j);
11
12     for i = 1:(8)
13         B0 = 0.25 * (Bmed_0(i) + Bmed_90(i) + 2*Bmed_45(i));
14         A1 = 0.5 * (Bmed_0(i) - Bmed_90(i));
15         A2 = 0.25 * (Bmed_0(i) + Bmed_90(i) - 2*Bmed_45(i));
16         B = B0 + A1 * cos(2*alfa) + A2 * cos(4*alfa);
17         arraycalc(j,i) = B;
18     end
19 end
20
21
22
23
24
Command Window
>> run scriptAnisotropiaCalc
A >>

```

Fonte: da Autora

Figura 14 – Código utilizado para geração dos dados através do formulário - Parte 2

```

Editor - ScriptAnisotropiaCalc.m  Variables - arraycalc
arraycalc
19x81 double
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
1 0 0.3420 0.9035 1.3625 1.4807 1.5418 1.5813 1.6104 1.6316 1.6477 1.6610 1.6727 1.6820 1.6912 1.6983 1.7057 1.7118 1.7160 1.7200
2 0 0.0029 0.0157 0.0283 0.0442 0.0633 0.0846 0.1173 0.1595 0.2132 0.3105 0.4332 0.5901 0.7493 0.8465 0.8957 1.0184 1.0605 1.1026 1.1447
3 0 0.0013 0.0037 0.0085 0.0185 0.0246 0.0349 0.0451 0.0557 0.0704 0.089 0.1095 0.1395 0.1877 0.2576 0.3682 0.5223 0.6923 0.8465 0.9901
4 0 0.0873 0.1745 0.2618 0.3491 0.4363 0.5236 0.6109 0.6981 0.7854 0.8727 0.9600 1.0473 1.1346 1.2219 1.3092 1.3965 1.4838 1.5711 1.6584
5 0 0.0029 0.0157 0.0283 0.0442 0.0633 0.0846 0.1173 0.1595 0.2132 0.3105 0.4332 0.5901 0.7493 0.8465 0.8957 1.0184 1.0605 1.1026 1.1447
6 0 0.0013 0.0037 0.0085 0.0185 0.0246 0.0349 0.0451 0.0557 0.0704 0.089 0.1095 0.1395 0.1877 0.2576 0.3682 0.5223 0.6923 0.8465 0.9901
7 0 0.0873 0.1745 0.2618 0.3491 0.4363 0.5236 0.6109 0.6981 0.7854 0.8727 0.9600 1.0473 1.1346 1.2219 1.3092 1.3965 1.4838 1.5711 1.6584
8 0 0.0029 0.0157 0.0283 0.0442 0.0633 0.0846 0.1173 0.1595 0.2132 0.3105 0.4332 0.5901 0.7493 0.8465 0.8957 1.0184 1.0605 1.1026 1.1447
9 0 0.0013 0.0037 0.0085 0.0185 0.0246 0.0349 0.0451 0.0557 0.0704 0.089 0.1095 0.1395 0.1877 0.2576 0.3682 0.5223 0.6923 0.8465 0.9901
10 0 0.0873 0.1745 0.2618 0.3491 0.4363 0.5236 0.6109 0.6981 0.7854 0.8727 0.9600 1.0473 1.1346 1.2219 1.3092 1.3965 1.4838 1.5711 1.6584
11 0 0.0029 0.0157 0.0283 0.0442 0.0633 0.0846 0.1173 0.1595 0.2132 0.3105 0.4332 0.5901 0.7493 0.8465 0.8957 1.0184 1.0605 1.1026 1.1447
12 0 0.0013 0.0037 0.0085 0.0185 0.0246 0.0349 0.0451 0.0557 0.0704 0.089 0.1095 0.1395 0.1877 0.2576 0.3682 0.5223 0.6923 0.8465 0.9901
13 0 0.0873 0.1745 0.2618 0.3491 0.4363 0.5236 0.6109 0.6981 0.7854 0.8727 0.9600 1.0473 1.1346 1.2219 1.3092 1.3965 1.4838 1.5711 1.6584
14 0 0.0029 0.0157 0.0283 0.0442 0.0633 0.0846 0.1173 0.1595 0.2132 0.3105 0.4332 0.5901 0.7493 0.8465 0.8957 1.0184 1.0605 1.1026 1.1447
15 0 0.0013 0.0037 0.0085 0.0185 0.0246 0.0349 0.0451 0.0557 0.0704 0.089 0.1095 0.1395 0.1877 0.2576 0.3682 0.5223 0.6923 0.8465 0.9901
16 0 0.0873 0.1745 0.2618 0.3491 0.4363 0.5236 0.6109 0.6981 0.7854 0.8727 0.9600 1.0473 1.1346 1.2219 1.3092 1.3965 1.4838 1.5711 1.6584
17 0 0.0029 0.0157 0.0283 0.0442 0.0633 0.0846 0.1173 0.1595 0.2132 0.3105 0.4332 0.5901 0.7493 0.8465 0.8957 1.0184 1.0605 1.1026 1.1447
18 0 0.0013 0.0037 0.0085 0.0185 0.0246 0.0349 0.0451 0.0557 0.0704 0.089 0.1095 0.1395 0.1877 0.2576 0.3682 0.5223 0.6923 0.8465 0.9901
19 0 0.0873 0.1745 0.2618 0.3491 0.4363 0.5236 0.6109 0.6981 0.7854 0.8727 0.9600 1.0473 1.1346 1.2219 1.3092 1.3965 1.4838 1.5711 1.6584
Command Window
>> run scriptAnisotropiaCalc
A >>

```

Fonte: da Autora

Uma vez aplicado o código expresso nas Figuras 13 e 14 utilizou-se os dados gerados para descobrir os valores para ângulos em passo de 5°, variando de 0° até 90°. O objetivo deste novo código, foi de plotar as diferentes curvas e obter um detalhamento maior dos pontos encontrados para a densidade de fluxo magnético - B relacionada a determinado valor de indução magnética - H. Como na equação apresentada, a variável 'A' corresponde ao valor da indução magnética.

As Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20 apresentadas neste escopo, expõe trechos do código implementado. Basicamente, trata-se de uma

Figura 18 – Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 4

```

1 script.m X
2
3 % Titulo - Angulos medidos
4
5 title('Dados medidos - experimental');
6
7 plot(h, Bmed_0, '-r');
8
9 plot(h, Bmed_15, '-g');
10
11 plot(h, Bmed_30, '-b');
12
13 plot(h, Bmed_45, '-m');
14
15 plot(h, Bmed_60, '-k');
16
17 plot(h, Bmed_75, '-c');
18
19 plot(h, Bmed_90, '-r');
20
21 legend('Angulo 0°(ciclo)', 'Angulo 15°(ciclo)', 'Angulo 30°(ciclo)', 'Angulo 45°(ciclo)', 'Angulo 60°(ciclo)', 'Angulo 75°(ciclo)', 'Angulo 90°(ciclo)');
22
23 % Titulo - Angulos calculados
24
25 title('Dados calculados - compensação');
26
27 plot(h, Bcal_0, '-r');
28
29 plot(h, Bcal_15, '-g');
30
31 plot(h, Bcal_30, '-b');
32
33 plot(h, Bcal_45, '-m');
34
35 plot(h, Bcal_60, '-k');
36
37 plot(h, Bcal_75, '-c');
38
39 plot(h, Bcal_90, '-r');
40
41 legend('Angulo 0°(ciclo)', 'Angulo 15°(ciclo)', 'Angulo 30°(ciclo)', 'Angulo 45°(ciclo)', 'Angulo 60°(ciclo)', 'Angulo 75°(ciclo)', 'Angulo 90°(ciclo)');
42
43

```

Fonte: da Autora

Figura 19 – Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 5

```

1 script.m X
2
3 % Titulo - Angulos medidos X Angulo calculado
4
5 legend('Dados medidos', 'Dados calculados');
6
7 title('Dados medidos X Dados calculados para 0°');
8
9 plot(h, Bmed_0, '-r');
10
11 plot(h, Bcal_0, '-r');
12
13
14
15
16
17 title('Dados medidos X Dados calculados para 15°');
18
19 plot(h, Bmed_15, '-g');
20
21 plot(h, Bcal_15, '-g');
22
23
24
25
26
27 title('Dados medidos X Dados calculados para 30°');
28
29 plot(h, Bmed_30, '-b');
30
31 plot(h, Bcal_30, '-b');
32
33
34
35
36
37 title('Dados medidos X Dados calculados para 45°');
38
39 plot(h, Bmed_45, '-m');
40
41 plot(h, Bcal_45, '-m');
42
43
44
45
46
47 title('Dados medidos X Dados calculados para 60°');
48
49 plot(h, Bmed_60, '-k');
50
51 plot(h, Bcal_60, '-k');
52
53
54
55
56
57 title('Dados medidos X Dados calculados para 75°');
58
59 plot(h, Bmed_75, '-c');
60
61 plot(h, Bcal_75, '-c');
62
63
64
65
66
67 title('Dados medidos X Dados calculados para 90°');
68
69 plot(h, Bmed_90, '-r');
70
71 plot(h, Bcal_90, '-r');
72
73
74
75
76

```

Fonte: da Autora

Figura 20 – Código utilizado para geração dos gráficos - Parte 6

```

1 script.m X
2
3 % Titulo - Angulos calculados
4
5 title('Dados calculados para o Angulo de 90°');
6
7 plot(h, Bcal_0, '-r');
8
9 plot(h, Bcal_15, '-g');
10
11 plot(h, Bcal_30, '-b');
12
13 plot(h, Bcal_45, '-m');
14
15 plot(h, Bcal_60, '-k');
16
17 plot(h, Bcal_75, '-c');
18
19 plot(h, Bcal_90, '-r');
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122

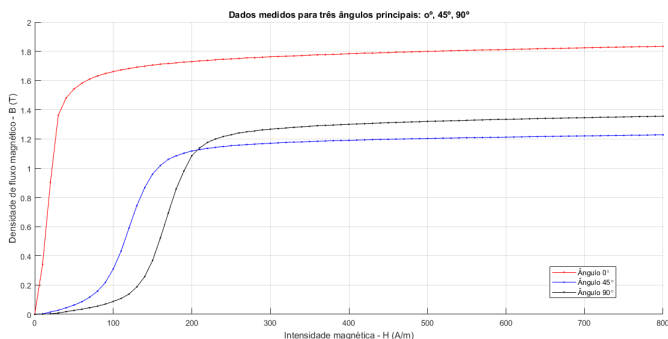
```

Fonte: da Autora

5 RESULTADOS OBTIDOS

Para plotar os gráficos, utilizou-se os dados calculados com o código expresso nas figuras 13 e 14, salientados no capítulo anterior. Nas equações utilizou-se os dados experimentais obtidos das medições para os ângulos de 0° , 45° e 90° . O Gráfico 2 apresenta a curva interpolada com o conjunto de pontos para cada um desses ângulos.

Gráfico 2 – Curvas geradas com o conjunto de pontos disponibilizado para os ângulos de 0° , 45° , e 90°



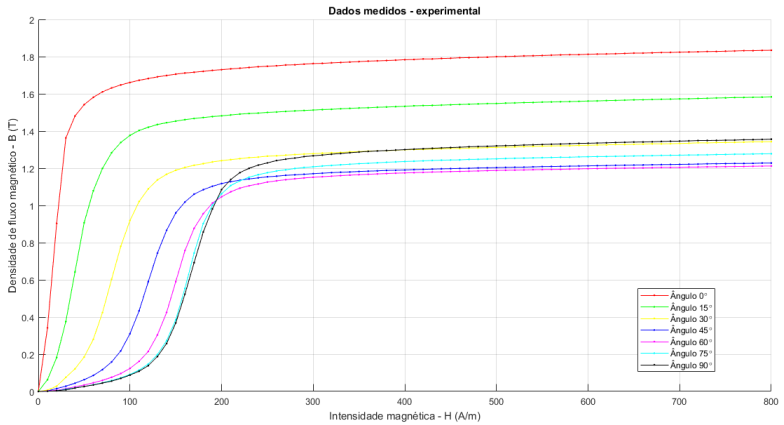
Fonte: da Autora

Além dos três ângulos apresentados no Gráfico 2, também dispôs-se das medidas de intensidade magnética por densidade de fluxo magnético para os ângulos de 15° , 30° , 60° e 75° . Neste caso, buscou-se também relacionar este conjunto de dados conforme o Gráfico 3.

Também, as mesmas sete curvas plotadas no gráfico 3 - dos ângulos disponibilizados: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90° respectivamente, foram plotadas com os dados também calculados, conforme o Gráfico 4.

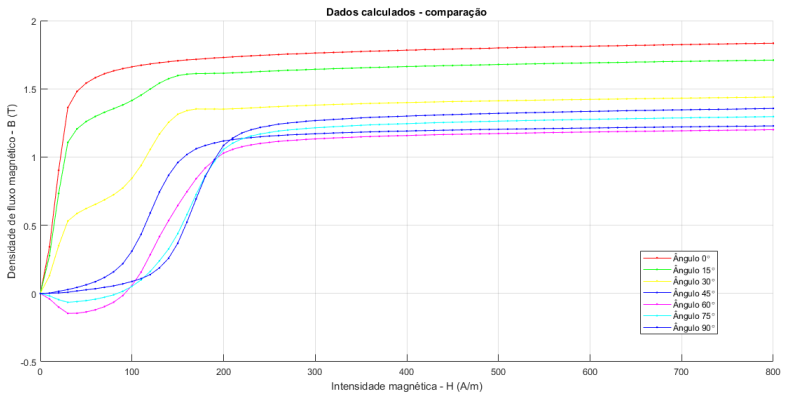
Para fins de comparação, buscou-se comparar os dados calculados com os provenientes das medições. Neste caso, para cada um dos sete ângulos dos quais também obteve-se os dados por medições, buscou-se comparar as curvas medidas e calculadas no mesmo gráfico. Os Gráficos 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 mostram estes resultados para cada um dos ângulos que dispunham de dados medidos e calculados.

Gráfico 3 – Curvas geradas com o conjunto de pontos disponibilizado para os ângulos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°



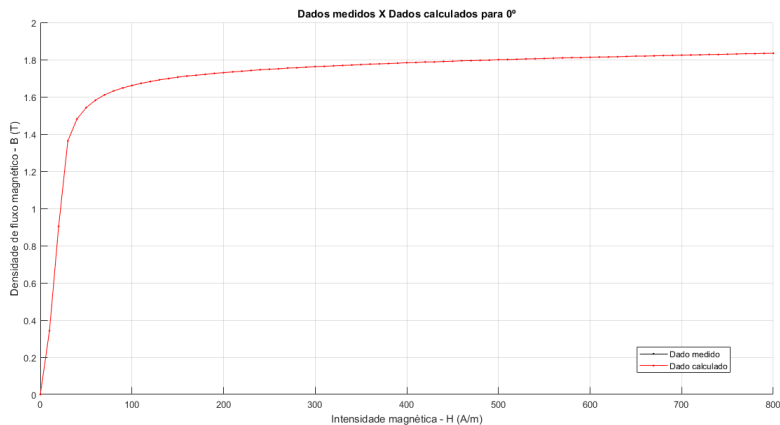
Fonte: da Autora

Gráfico 4 – Curvas geradas com o conjunto de pontos calculado para os ângulos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°



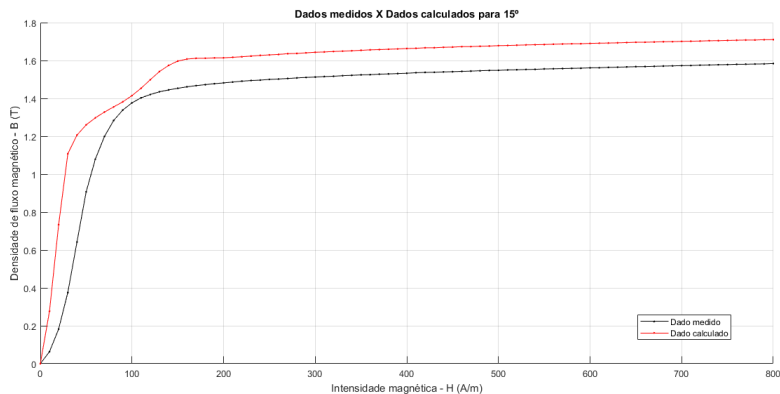
Fonte: da Autora

Gráfico 5 – Comparação entre dados medidos e calculados com o *script* realizado - ângulo de 0°



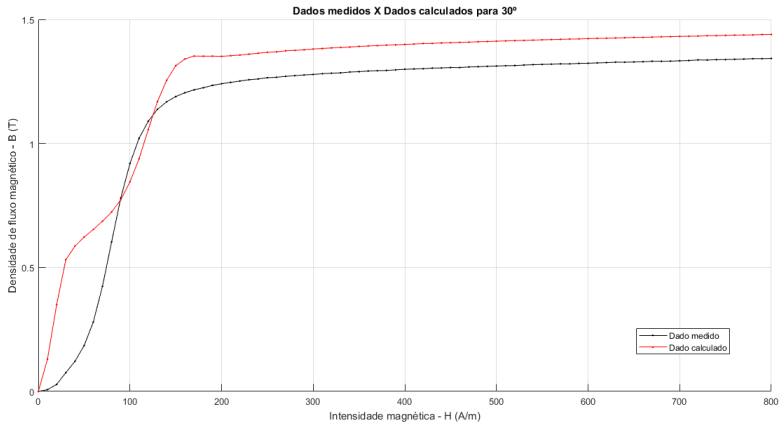
Fonte: da Autora

Gráfico 6 – Comparação entre dados medidos e calculados com o *script* realizado - ângulo de 15°



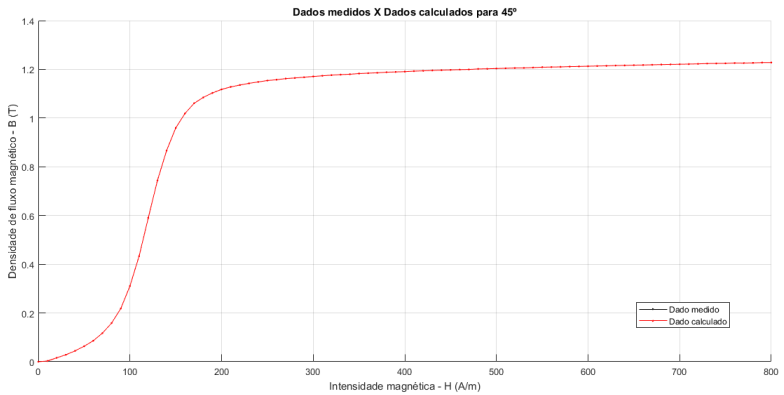
Fonte: da Autora

Gráfico 7 – Comparação entre dados medidos e calculados com o *script* realizado - ângulo de 30°



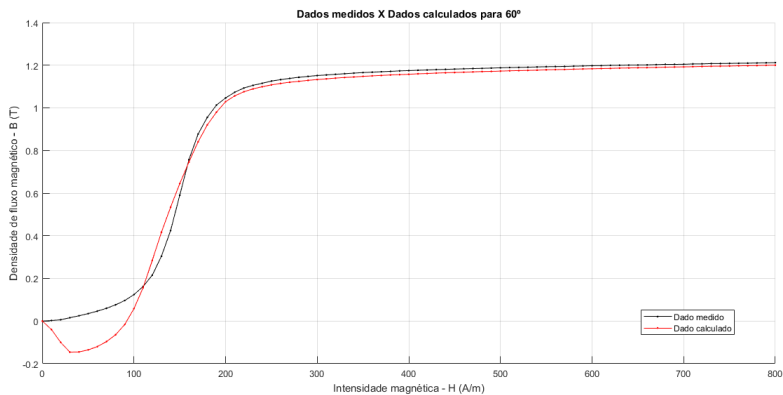
Fonte: da Autora

Gráfico 8 – Comparação entre dados medidos e calculados com o *script* realizado - ângulo de 45°



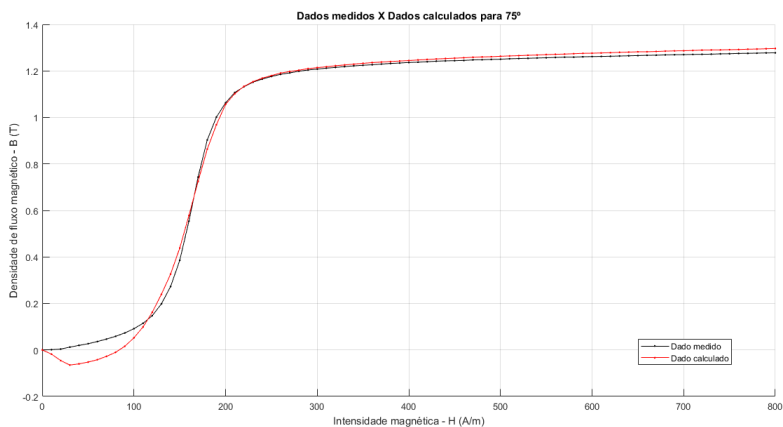
Fonte: da Autora

Gráfico 9 – Comparação entre dados medidos e calculados com o *script* realizado - ângulo de 60°



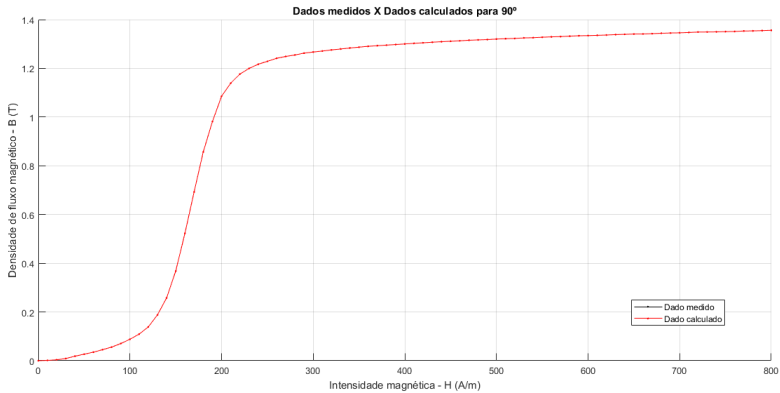
Fonte: da Autora

Gráfico 10 – Comparação entre dados medidos e calculados com o *script* realizado - ângulo de 75°



Fonte: da Autora

Gráfico 11 – Comparação entre dados medidos e calculados com o *script* realizado - ângulo de 90°



Fonte: da Autora

Como observa-se nos Gráficos 5, 8 e 11, as curvas para os ângulos de 0°, 45° e 90° ficam sobrepostas pois os valores obtidos são iguais e são os que foram utilizados na fórmula. Por outro lado, nota-se que para os demais ângulos, as curvas apresentam uma tendência diferenciada - incluindo pequenos picos não observados nas curvas dos dados plotados para as medições.

Uma vez que para os ângulos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°, têm-se os dados provenientes de medições e os calculados através do código desenvolvido, pôde-se calcular a correlação entre as curvas, conforme a Figura 21.

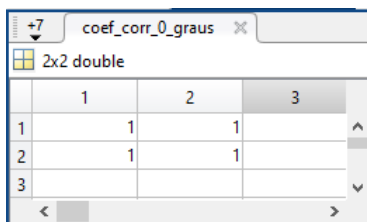
Figura 21 – Resumo dos coeficientes de correlação obtidos com a função programada em *software*

	coef_corr_0_graus	[1 1;1 1]
	coef_corr_15_graus	[1 0.9562;0.9562 1]
	coef_corr_30_graus	[1 0.9744;0.9744 1]
	coef_corr_45_graus	[1 1;1 1]
	coef_corr_60_graus	[1 0.9955;0.9955 1]
	coef_corr_75_graus	[1 0.9990;0.9990 1]
	coef_corr_90_graus	[1 1;1 1]

Fonte: da Autora

Assim, analisando-se as Figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28, observa-se que para os ângulos de 0° , 45° e 90° em que as curvas de medição e calculada ficam sobrepostas, a correlação é um. Como os coeficientes vão de um negativo (correlação negativa) até um positivo (correlação positiva) e sabendo-se que valores próximos de zero indicam que não há correlação linear entre as variáveis, além disso, observando-se que quanto mais próximo de um positivo ou de um negativo o coeficiente de correlação estiver maior é a relação entre as duas variáveis, pode-se comprovar que, de fato a correlação dos ângulos 0° , 45° e 90° é máxima (as curvas são, de fato iguais). Para os demais ângulos a correlação também é alta, variando de 0,95 a 0,97 quando não alcança o valor máximo, de um positivo.

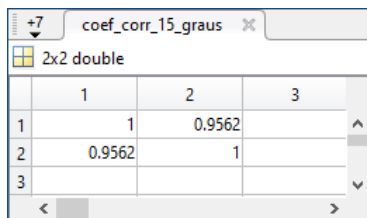
Figura 22 – Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 0°



	1	2	3
1	1	1	
2		1	1
3			

Fonte: da Autora

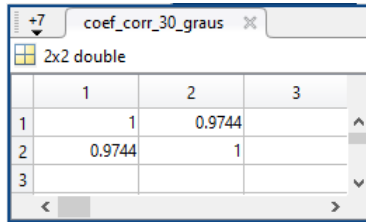
Figura 23 – Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 15°



	1	2	3
1	1	0.9562	
2	0.9562	1	
3			

Fonte: da Autora

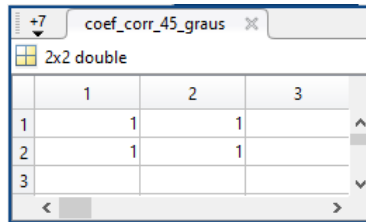
Figura 24 – Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 30°



	1	2	3
1	1	0.9744	
2	0.9744	1	
3			

Fonte: da Autora

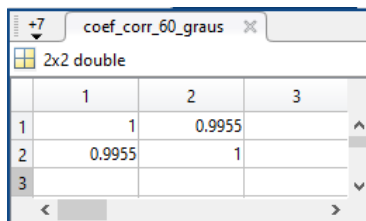
Figura 25 – Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 45°



	1	2	3
1	1	1	
2	1	1	
3			

Fonte: da Autora

Figura 26 – Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 60°



	1	2	3
1	1	0.9955	
2	0.9955	1	
3			

Fonte: da Autora

Figura 27 – Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 75°

	1	2	3
1	1	0.9990	
2	0.9990	1	
3			

Fonte: da Autora

Figura 28 – Coeficientes de correlação entre dados medidos e calculados - ângulo de 90°

	1	2	3
1	1	1	
2	1	1	
3			

Fonte: da Autora

Os valores entre dois pontos é aproximado e entende-se que, tanto o cálculo quanto a curva que liga os pontos são obtidos por uma aproximação.

5.0.1 Discussão

As curvas foram medidas para o mesmo aço, esses dados iniciais que foram disponibilizados e utilizados nos cálculos e na comparação entre as curvas apresentavam, contudo, a excitação aplicada em diferentes ângulos em relação à direção de laminação, sendo 0° a direção de laminação.

Desta forma, entende-se que as curvas encontradas através dos vetores calculados são as esperadas. Elas teriam o formato diferenciado devido a ordem reduzida das equações (terceira ordem). Neste caso, aumentando a ordem da ODF, ou seja, usando mais curvas ex-

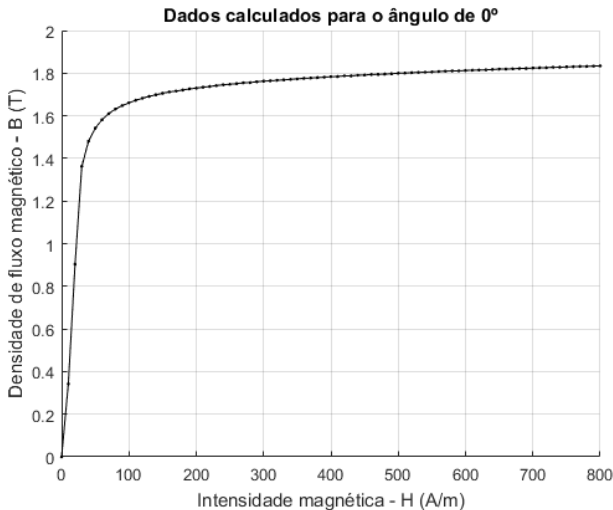
perimentais, elas tendem a se aproximar do formato típico. Contudo, considerando-se a quantidade de curvas medidas disponível, os resultados mostraram-se coerentes.

Em suma com os resultados obtidos, basicamente, iniciou-se com o equacionamento apresentado no capítulo 4. Posteriormente, as equações apresentadas e provenientes da bibliografia foram utilizadas com o intuito de gerar as curvas para quaisquer ângulos através dos valores já disponíveis.

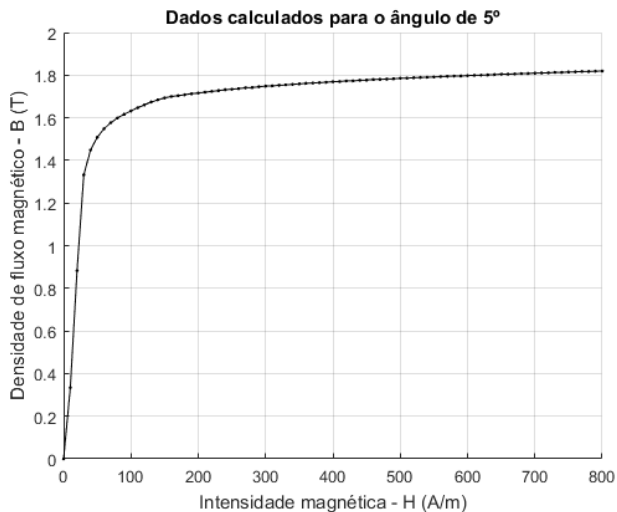
Por fim, plotou-se cada uma das curvas calculadas individualmente. O objetivo de apresentar esses gráficos de forma individual é de poder-se prever os dados para os mais diversos ângulos sem necessariamente ter um arquivo executável ou *software* instalado. A visualização destes gráficos em separado se dá devido a grande quantidade de curvas geradas.

É importante salientar os aspectos físicos dos resultados visualizados nas curvas. A medida que o ângulo de excitação se afasta da magnetização, a saturação cai e a curva se mostra menos uniforme.

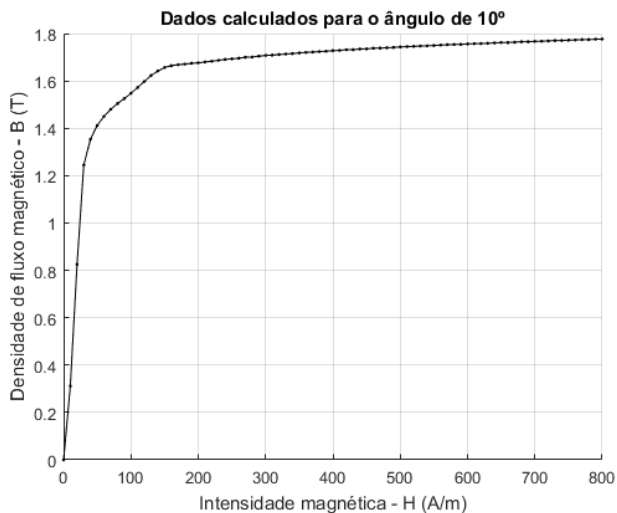
Gráfico 12 – Curva para os dados calculados com ângulo de 0°



Fonte: da Autora

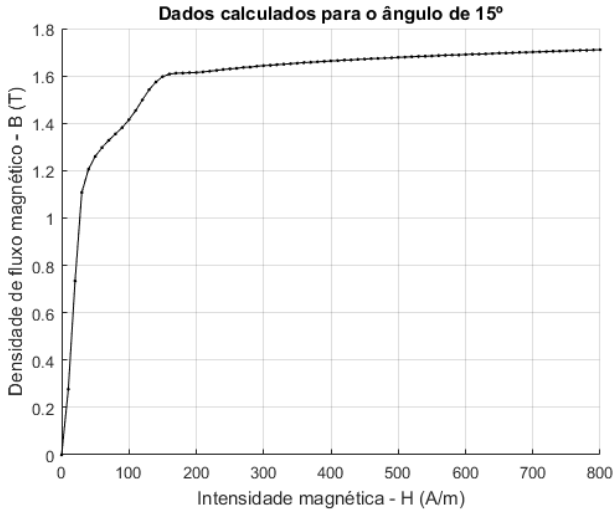
Gráfico 13 – Curva para os dados calculados com ângulo de 5° 

Fonte: da Autora

Gráfico 14 – Curva para os dados calculados com ângulo de 10° 

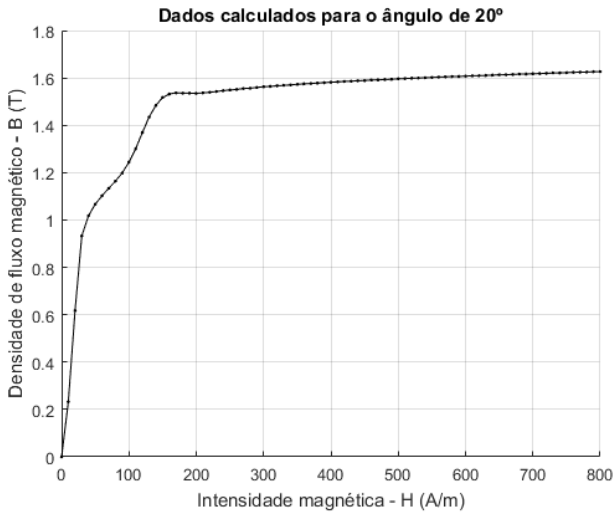
Fonte: da Autora

Gráfico 15 – Curva para os dados calculados com ângulo de 15°



Fonte: da Autora

Gráfico 16 – Curva para os dados calculados com ângulo de 20°



Fonte: da Autora

Gráfico 17 – Curva para os dados calculados com ângulo de 25°

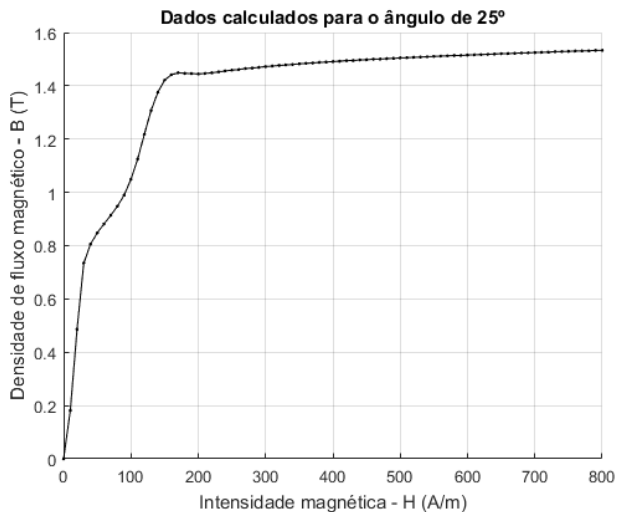


Gráfico 18 – Curva para os dados calculados com ângulo de 30°

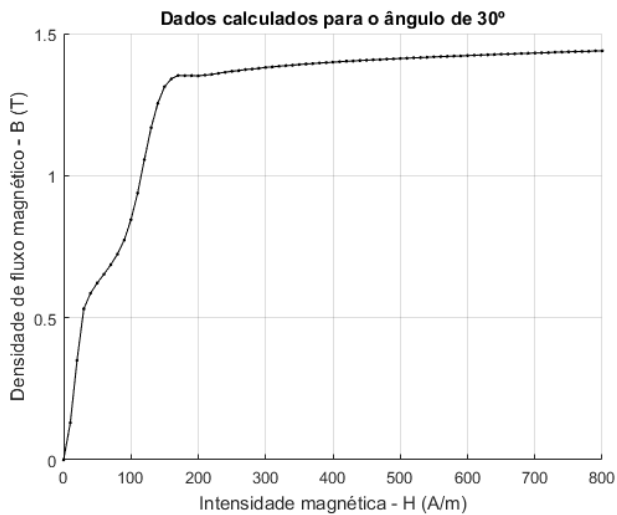


Gráfico 19 – Curva para os dados calculados com ângulo de 35°

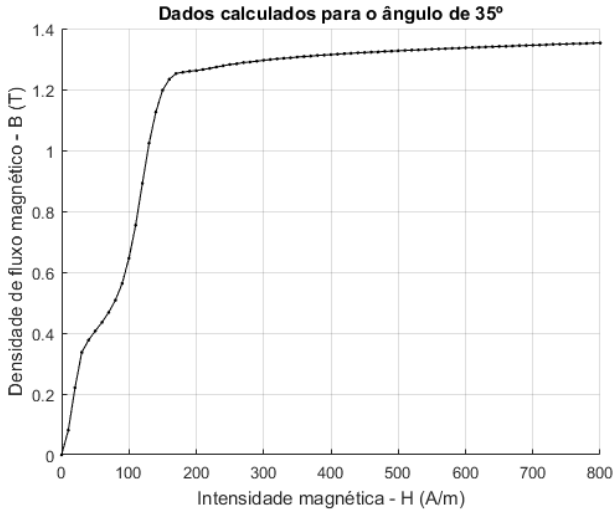


Gráfico 20 – Curva para os dados calculados com ângulo de 40°

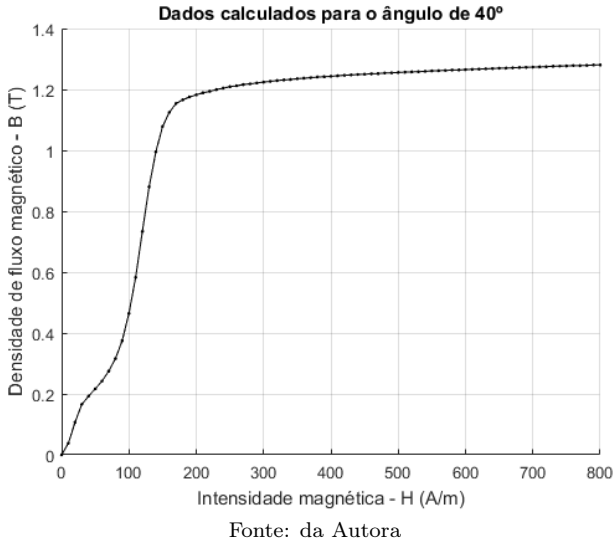
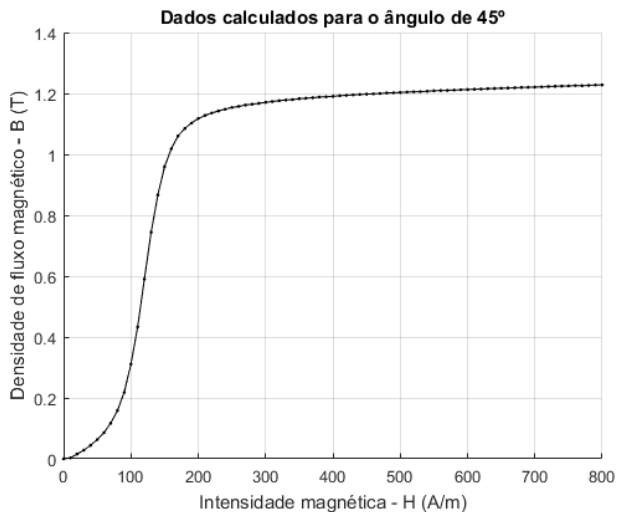
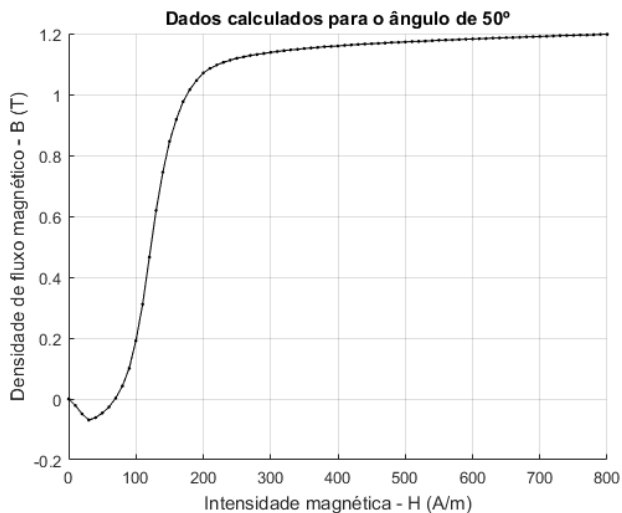


Gráfico 21 – Curva para os dados calculados com ângulo de 45°



Fonte: da Autora

Gráfico 22 – Curva para os dados calculados com ângulo de 50°



Fonte: da Autora

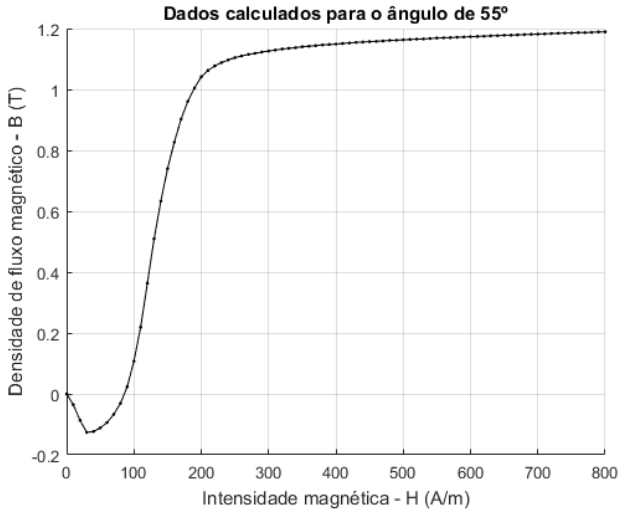
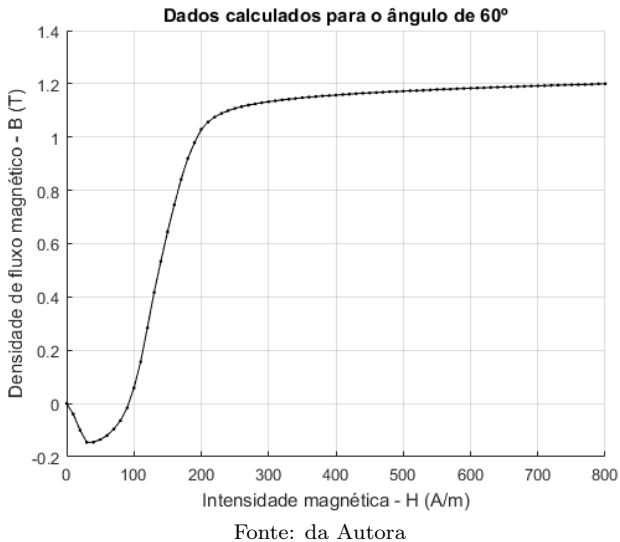
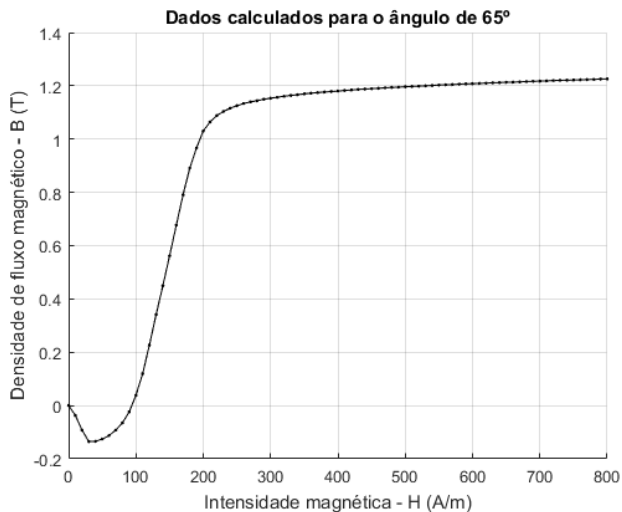
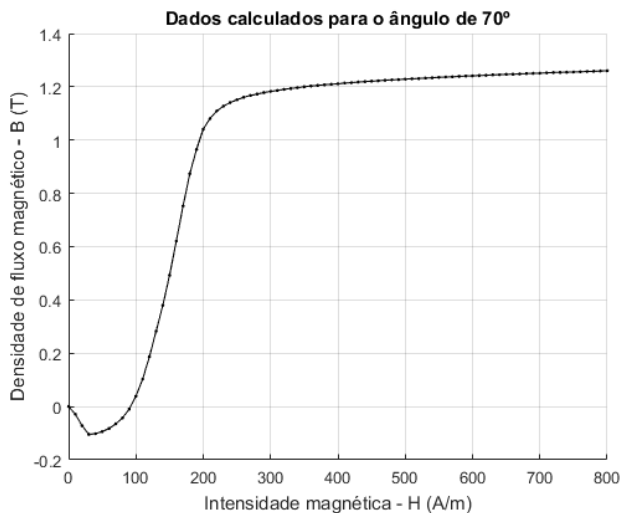
Gráfico 23 – Curva para os dados calculados com ângulo de 55° Gráfico 24 – Curva para os dados calculados com ângulo de 60° 

Gráfico 25 – Curva para os dados calculados com ângulo de 65° 

Fonte: da Autora

Gráfico 26 – Curva para os dados calculados com ângulo de 70° 

Fonte: da Autora

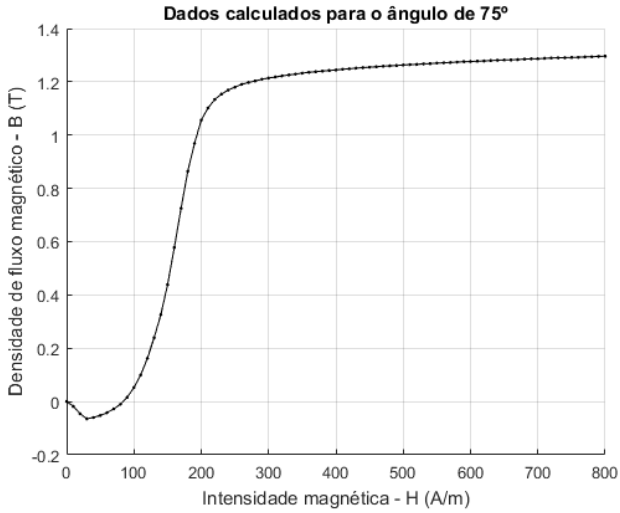
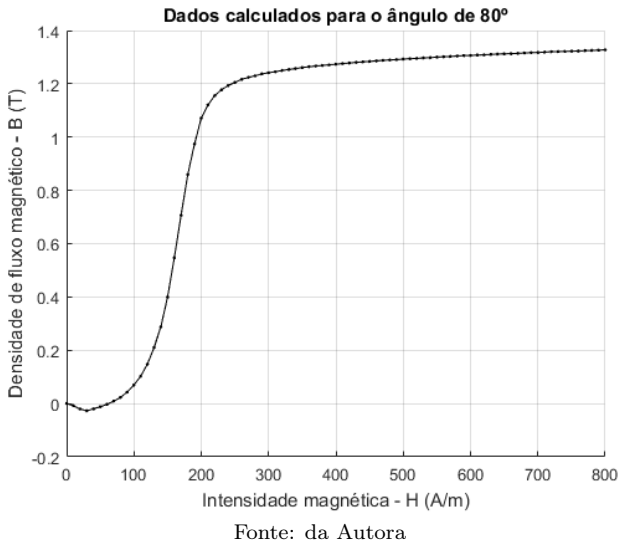
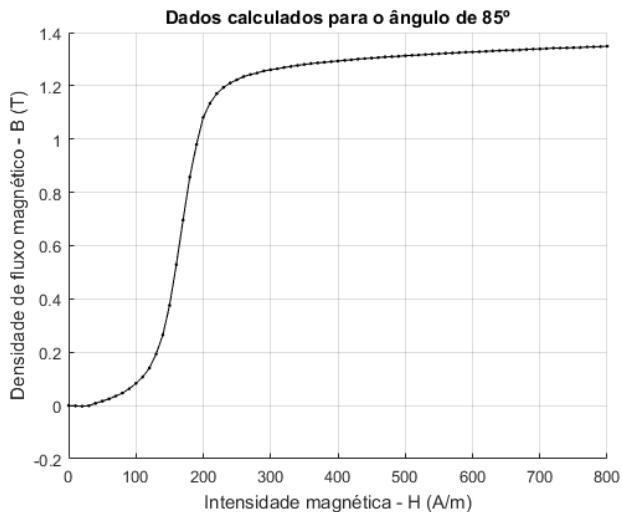
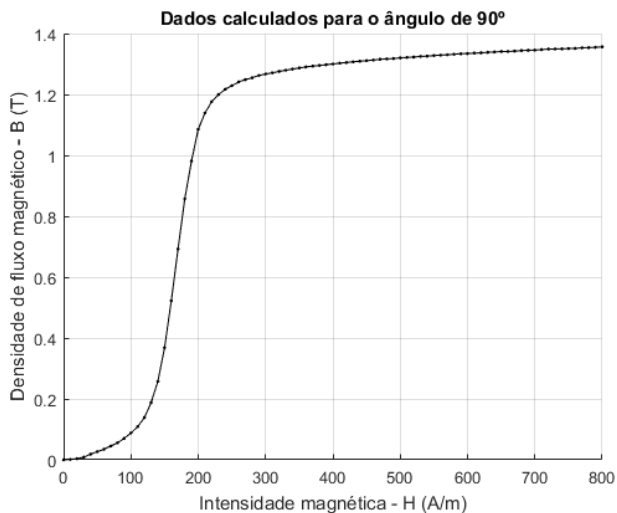
Gráfico 27 – Curva para os dados calculados com ângulo de 75° Gráfico 28 – Curva para os dados calculados com ângulo de 80° 

Gráfico 29 – Curva para os dados calculados com ângulo de 85° 

Fonte: da Autora

Gráfico 30 – Curva para os dados calculados com ângulo de 90° 

Fonte: da Autora

6 CONCLUSÃO

Nesta seção são apresentadas as considerações finais e possíveis trabalhos futuros.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve por finalidade trazer para o contexto do estudo das propriedades magnéticas dos materiais, mais especificamente, o estudo direcionado à anisotropia em aços para fins elétricos de grão orientado, uma opção para entender e interpretar o efeito da anisotropia e a tendência de comportamento que este fenômeno gera. Para isso, através de um conjunto de medições realizadas desenvolveu-se um modelo capaz de prever o valor para as curvas B/H para diferentes ângulos.

Através do modelo proposto, observou-se que, se o material fosse isotrópico, todas as curvas deveriam ser idênticas, mas a anisotropia mostra que o material reage de maneira diferente (com curvas B/H diferentes), para cada ângulo em que é excitado.

Também, comprovou-se o método proposto por (CHWASTEK et al., 2015), e observou-se que, considerando a forma de cálculo como uma alternativa justificada, é suficiente medir as propriedades magnéticas em três direções principais, a saber, de 0° , 45° e 90° , para se prever as variações em outros ângulos, e este foi o teste empregado neste trabalho com base na teoria apresentada. Outra informação relevante é que A1 e A2 (que são coeficientes das equações), poderiam ser usados como índices de anisotropia e suas variações em relação à força do campo são opostas, então, os ângulos podem demonstrar propriedades magnéticas anisotrópicas, conforme observou-se nos gráficos gerados no capítulo 5 desde escopo.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Visando obter dados ainda mais próximos dos reais (como obtidos por medições reais), bem como, ampliando-se a complexibilidade do trabalho e acurácia nos resultados, pode-se aumentar a ordem da equação, ou mesmo utilizar de outros métodos, não necessariamente utilizando funções de distribuição de orientação - ODF.

REFERÊNCIAS

ACESITA. *Aços ao silício de grão orientado - curvas típicas*. 2002.

AMAR, M. *Caractérisation et Prédiction des Pertes dans les Tôles Fer Silicium Soumises à des Tensions Non-Sinusoidales, Application au Cas de la MLI*. [S.l.]: Paris, 1994.

BASTOS, J.; QUICHAUD, G. 3d modelling of a non-linear anisotropic lamination. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 21, n. 6, p. 2366–2369, 1985.

BUNGE, H.-J. *Texture analysis in materials science: mathematical methods*. [S.l.]: Elsevier, 2013.

CAMPOS, M. D.; LANDGRAF, F.; TSCHIPTSCHIN, A. A method to estimate magnetic induction from texture in non-oriented electrical steels. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Elsevier, v. 226, p. 1536–1538, 2001.

CHENG, Z. et al. Analysis and measurements of iron loss and flux inside silicon steel laminations. *IEEE transactions on magnetics*, IEEE, v. 45, n. 3, p. 1222–1225, 2009.

CHWASTEK, K. et al. A description for the anisotropy of magnetic properties of grain-oriented steels. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 51, n. 12, p. 1–5, 2015.

CORNUT, B.; KEDOUS-LEBOUC, A.; WAECKERLÉ, T. From metallurgy to modelling of electrical steels: A multiple approach to their behaviour and use based on physics and experimental investigations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Elsevier, v. 160, p. 102–108, 1996.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. *Introduction to magnetic materials*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

DEDULLE, J. et al. Magnetic fields in nonlinear anisotropic grain-oriented iron-sheet. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 26, n. 2, p. 524–527, 1990.

DEMIAN, C. et al. Ac magnetic circuits using nonsegmented shifted grain oriented electrical steel sheets: Impact on induction machine

magnetic noise. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 48, n. 4, p. 1409–1412, 2012.

FIORILLO, F. et al. Comprehensive model of magnetization curve, hysteresis loops, and losses in any direction in grain-oriented Fe-Si. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 38, n. 3, p. 1467–1476, 2002.

HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.

JIANG, F.; ROSSI, M.; PARENT, G. Anisotropy model for modern grain oriented electrical steel based on orientation distribution function. *AIP Advances*, AIP Publishing, v. 8, n. 5, p. 056104, 2018.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. *Transformer engineering*. [S.l.]: Marcel Dekker, 2004.

LANCAROTTE, M. S.; JR, A. d. A. P. Previsão das perdas magnéticas na presença de harmônicos. 1999.

LANDGRAF, F.; TEIXEIRA, J.; EMURA, M. Aços carbono e aços silício para fins elétricos. *Instituto Politécnico. São Paulo, Apostila do curso organizado pelo laboratório de metalurgia do pó e materiais magnéticos do IPT*, 2002.

LANDGRAF, F. J. G. et al. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. *Aços: perspectivas para os próximos*, v. 10, p. 109–128, 2002.

LANGFORD, W.; SNYDER, S.; BAUSCH, J. New criteria for predicting the press performance of deep drawing steels. *Trans, Amer. Soc. Metals*, v. 42, p. 1197–1232, 1950.

MEURER, E. J. *Estudo das perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas. 2005. 112 p.* Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Centro Tecnológico . . . , 2005.

NAKATA, T. et al. Numerical analysis of flux distributions in cores made of anisotropic materials. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Elsevier, v. 133, n. 1-3, p. 377–381, 1994.

OSSART, F.; MEKHICHE, M.; WAECKERLÉ, T. Numerical simulation of an Epstein frame used for anisotropy measurements. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Elsevier, v. 160, p. 71–72, 1996.

PÉRA, T.; OSSART, F.; WAECKERLE, T. Numerical representation for anisotropic materials based on coenergy modeling. *Journal of applied physics*, AIP, v. 73, n. 10, p. 6784–6786, 1993.

RAY, R.; JONAS, J. J.; HOOK, R. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels. *International materials reviews*, Taylor & Francis, v. 39, n. 4, p. 129–172, 1994.

SANTOS, J. P. et al. Influências do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos o efeito textura. Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

WANG, H.; LI, C.-s.; ZHU, T. Hard magnetization direction and its relation with magnetic permeability of highly grain-oriented electrical steel. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Springer, v. 21, n. 11, p. 1077–1082, 2014.

WOLF, G. *Encyclopaedia cinematographica*. [S.l.]: Institut fur den Wissenschaftlichen Film, 1974.

YONAMINE, T. et al. Anisotropia das propriedades magnéticas de aços semi-processados. In: *57º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais-ABM-Internacional*. [S.l.: s.n.], 2002.

ZHANG, Y. et al. Measurement and modeling of anisotropic magnetostriction characteristic of grain-oriented silicon steel sheet under dc bias. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 50, n. 2, p. 361–364, 2014.